

# **Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma**

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ingenieur

vorgelegt von

René Schramm  
aus Marktleugast

Als Dissertation genehmigt von  
der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	01.12.2015
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. Dr. Peter Greil

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
	Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, welcher mir durch das in mich gesetzte Vertrauen die Promotion ermöglichte. Die stetige Unterstützung meiner Forschungsarbeiten in den Bereichen der Elektronikproduktion sowie die intensive Förderung beim Aufbau des MID-Applikationszentrums (MIDAZ) haben mich ebenso geprägt wie die zahlreichen wertvollen Diskussionen. Darüber hinaus möchte ich für die Übernahme des ersten Gutachtens bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, Inhaber des Lehrstuhls für Photonische Technologien der FAU, danke ich für die Übernahme des zweiten Gutachtens. Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Fey als weiterem Mitglied des Prüfungsausschusses. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls FAPS, danke ich für den Vorsitz des Promotionsverfahrens.

Diese Dissertation beruht in Teilen auf Ergebnissen, die im Rahmen von Förderprojekten erzielt wurden. Für die Finanzierung dieser Projekte sei dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gedankt. Einen besonderen Dank möchte ich an Herrn Dr. rer. nat. Wolfgang John für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und sein persönliches Engagement richten.

Ein großer Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl FAPS. Besonders möchte ich mich bei allen Kollegen und Freunden des Forschungsbereichs Elektronikproduktion, Stefan Härter, Michael Pfeffer, Johannes Hörber, Christopher Kästle, Aarief Syed Khaja, Ping Xu, Leonard Maußner, Siegfried Maly, Gerald Gion, Denis Kozic, Horst Schuster, Alireza Esfandyari, Thomas Reitberger, Payam Daneschwar, Dr.-Ing. Andreas Reinhardt, Dr.-Ing. Christian Goth, Dr.-Ing. Michael Rösch und Dr.-Ing. Daniel Craiovan für den regen fachlichen Austausch und die überaus angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Eine besondere Würdigung verdienen Martin Müller und Thomas Kuhn, welchen ich für die großartige Zeit und die entstandenen Freundschaften im Besonderen danken möchte.

Mein herzlichster Dank gehört jedoch meiner Familie. Meine Eltern haben mich stets unermüdlich unterstützt und waren immer ein Hafen der Ruhe und des Wohlbefindens. Meine Freundin Julia Popp hat durch die immerwährende Unterstützung und die regelmäßigen Motivationsanstöße in Phasen der Verzweiflung einen enormen Anteil an der Fertigstellung dieser Arbeit. Ohne Ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Nürnberg, im Dezember 2015

René Schramm



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	5
2.1	Thermisches Spritzen	6
2.1.1	Kaltgasspritzen	7
2.1.2	Flammspitzen	8
2.1.3	Lichtbogenspritzen	8
2.1.4	Plasmaspritzen	9
2.2	Strukturierte Metallisierung mit CAPM	11
2.2.1	Plasmaerzeugung und Energieübertragung auf das Trägergas	11
2.2.2	Energietransfer des Trägergases auf die Pulverpartikel	15
2.2.3	Energietransfer der Pulverpartikel auf die Substratoberfläche	18
2.2.4	Plasmatechnologien für die additive Beschichtung	20
2.3	Einflussgrößen auf den CAPM-Prozess	23
2.4	Einsatzmöglichkeiten der CAPM-Technologie	27
2.4.1	MID-Technologie	27
2.4.2	Leistungselektronik	30
2.4.3	Handlungsbedarf für den Einsatz der CAPM-Technologie	32
<b>3</b>	<b>Entwicklung und Umsetzung eines Anlagenkonzeptes</b>	44
3.1	Auswahl eines geeigneten Handhabungssystems	45
3.2	Konzeption und Umsetzung der Prozesszelle	47
3.3	Anlagenkonzept für die Serienfertigung	58
<b>4</b>	<b>Charakterisierung und Prozessoptimierung der CAPM</b>	62
4.1	Thermoplastische Kunststoffe	62
4.2	Faserverbundwerkstoffe	79
4.2.1	Generierung von Kupferstrukturen auf GFK-Substraten	82
4.2.2	Generierung von Kupferstrukturen auf CFK-Substraten	87

4.3 Technische Keramik.....	90
4.3.1 Einfluss der Vorwärmtemperatur auf die Schichtdicke .....	91
4.3.2 Einfluss der Vorwärmtemperatur auf die Porosität.....	94
4.4 Siliziumhalbleiter .....	96
4.4.1 Einfluss der Prozessparametervariation .....	98
4.4.2 Fehlerbilder der vollflächigen Wafermetallisierung.....	101
4.5 Prozessmodell der CAPM-Technologie.....	103
<b>5 Thermische Simulation des CAPM-Prozesses .....</b>	<b>107</b>
5.1 Modellierung des Beschichtungsprozesses .....	109
5.2 Programmierung des Modells .....	112
5.3 CAPM ohne Maskierung .....	115
5.4 CAPM mit Maskierung.....	118
5.5 Evaluierung der Simulationsergebnisse .....	121
<b>6 Elektrische Kontaktierung der CAPM-Kupferstrukturen .....</b>	<b>124</b>
6.1 Charakterisierung der AVT auf Basis einer Kupfer-CAPM .....	126
6.1.1 Bestimmen der Haftzugfestigkeit .....	128
6.1.2 Bestimmen der Scherfestigkeit .....	131
6.1.3 Metallographische Untersuchungen.....	133
6.2 Mögliche Passivierung einer Kupfer-CAPM .....	135
<b>7 Zusammenfassung.....</b>	<b>139</b>
<b>8. Summary .....</b>	<b>142</b>
<b>9. Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>145</b>
<b>10 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>148</b>

# 1 Einleitung

Das produzierende Gewerbe der Bundesrepublik Deutschland ist weltweit wettbewerbsfähig und hält insbesondere auf dem Gebiet der Oberflächentechnik eine führende Stellung inne. Die Erhöhung der Funktionalität beliebiger Materialien infolge einer innovativen Beschichtung stellt in zahlreichen Bereichen des produzierenden Gewerbes eine Schlüsseltechnologie für neue Produkte dar und ermöglicht es, die steigenden Anforderungen an die eingesetzten Substratwerkstoffe zu kompensieren. Folglich werden zunehmend unterschiedliche Verfahren der Oberflächentechnik, sowohl in der Automobilindustrie und der Luftfahrt, als auch in der Energie- und Mikrosystemtechnik, eingesetzt. Diese vielfältigen Einsatzgebiete ermöglichen eine jährliche Wertschöpfung von circa 20 Mrd. €, obwohl die Potentialausschöpfung der Oberflächen- und Beschichtungstechnologie in Expertenkreisen nur auf 10 - 15% beziffert wird. Aus diesem Grund ist das stetige Interesse an innovativen Technologien und neuen Einsatzgebieten funktionalisierter Oberflächen unverändert. [1; 2]

Ein deutlicher Innovationssprung kann durch eine interdisziplinäre Kombination aus Mechanik und beispielsweise Elektronik erfolgen. Klassisch wird eine klare Funktionstrennung zwischen dem Volumen eines Bauteils und seiner Oberfläche vollzogen. Der Materialkörper erfüllt eine Primärfunktion (zumeist eine bestimmte Form) und die Beschichtung kann mit Hilfe der Oberflächentechnik auf ein gefordertes Anforderungsprofil hin angepasst werden und so weitere Funktionen übernehmen. Der Ansatz, eine nahezu beliebig geformte Oberfläche mit einer strukturierten metallischen Beschichtung als Schaltungs- und Bauteilträger auszuführen, stellt eine dahingehend vielversprechende Technologie für den Einsatz in der Elektronikproduktion dar. Räumliche elektronische Baugruppen (MID - Molded Interconnect Devices) basieren auf dem Prinzip einer funktionalisierten Oberfläche und ermöglichen es, aktuelle Anforderungen der Elektronikproduktion hinsichtlich Miniaturisierung, Formgebung, Flexibilität und Funktionsintegration in einem Produkt zu realisieren. Durch den Einsatz von MID können beispielsweise mechanische, elektrische, fluidische, thermische oder optische Funktionen in einem dreidimensionalen mechatronischen System gebündelt werden, somit Fertigungs- und Montagekosten gesenkt, Einzelkomponenten und Gewicht eingespart sowie eine höhere Gestaltungsfreiheit der Baugruppen erzielt werden. [3; 4]

Mit den etablierten 3D-MID-Herstellungsverfahren, wie beispielweise der Laserdirektstrukturierung (LDS) und dem Zweikomponentenspritzguss (2K), werden aktuell weitestgehend Sensor- und Signalstromanwendungen in der Automobil-, Medizin- und Telekommunikationstechnik gefertigt [5; 6]. Hierbei können einerseits die Vorteile der MID-Technik, wie Miniaturisierung und Funktionsintegration, optimal ausgeschöpft und andererseits nachteilige Eigenschaften, wie die limitierte Leistungsübertragung und die aufwändige Prozesskette der chemischen Metallisierung, umgangen werden. [7; 8]



Die Leistungselektronik stellt eine weitere Schlüsseltechnologie in Deutschland dar, welche gleichzeitig als wichtiger Innovationstreiber in zahlreichen Bereichen fungiert. So bildet sich beim Verbrauch globaler Ressourcen sukzessive ein neues Bewusstsein für die nachhaltige Erzeugung und Nutzung von Energie aus, welches durch die Erforschung neuartiger und die Weiterentwicklung aktueller Technologien stetig vorangetrieben wird. Besonders im Bereich der Elektromobilität, Antriebs- und Beleuchtungstechnik geraten bisherige Fertigungslösungen im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik kompakter Leistungsmodule infolge der steigenden Anforderungen technologisch an ihre Grenzen. Klassische Bondprozesse zur Chipkontaktierung werden hinsichtlich Wärmehotspots, Druckkräften und Miniaturisierungsaspekten hinterfragt, galvanische und chemische Metallisierungsschritte in der Chipfertigung erfordern aufgrund der stetig dünner werdenden Siliziumwafer eine zunehmend aufwändigere Handhabung. Folglich besteht ein enormes Interesse an alternativen Beschichtungstechnologien und innovativen Kontaktierungsverfahren. [9; 10; 11; 12]

Aktuelle Entwicklungen in der Plasmabeschichtungstechnologie ermöglichen eine additive Metallisierung beliebiger Oberflächen in einem Prozessschritt. Hierbei werden nano- und mikroskalige Metallpulver unter Verwendung eines elektrisch induzierten Plasmas auf die Bauteiloberfläche aufgetragen, um eine haftende und leitfähige Struktur auszubilden. Der Einsatz der Plasmatechnik ist bisher nicht etabliert, zeigt aber aufgrund der einfachen und kurzen Prozesskette ein enormes Potential für verschiedene industrielle Anwendungen. Die Komplexität des Beschichtungsprozesses setzt eine umfassende Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Prozessparametern voraus. Hierbei spielen beispielsweise unterschiedliche Haftungsmechanismen zwischen der Substratmaterialoberfläche und der additiv aufgetragenen Metallisierung, die geometrische Ausprägung der Schichtstruktur und die intermetallischen Eigenschaften eine entscheidende Rolle.

Um den genannten Anforderungen zu begegnen und sowohl neue Anwendungsfelder der MID-Technik, als auch alternative Herstellungsverfahren in der Leistungselektronik zu etablieren, werden in dieser wissenschaftlichen Arbeit Plasmatechnologien umfassend betrachtet. Ausgehend von einer Übersicht der verfügbaren Technologien, einer Betrachtung des aktuellen Stands der Technik und einer wissenschaftlichen Analyse des Handlungsbedarfs wird eine innovative Plasmatechnologie ausgewählt, um additiv unterschiedliche Substratmaterialien zu beschichten. Hierbei steht das Verständnis über die Einflüsse der Prozessparameter auf die erzeugten Schichtstrukturen in Abhängigkeit der variierenden Werkstoffe im Vordergrund. Die praktischen Untersuchungen begleitend erfolgt eine simulationstechnische Umsetzung auf Basis eines thermischen Modells des Beschichtungsprozesses, um zukünftig einen einfachen Transfer der Erkenntnisse ohne aufwändige Versuchsreihen auf weitere Werkstoffe zu ermöglichen. Abschließend wird das Potential der Plasmatechnologie hinsichtlich herkömmlicher Verbindungstechnologien in der Elektronikproduktion betrachtet.

## 2 Stand der Technik

Die additiven Fertigungstechnologien gewinnen zunehmend an Bedeutung: Sowohl im generativen Bereich zur Herstellung von Grundkörpern als auch zur Funktionalisierung von Substratmaterialien werden vermehrt additive Verfahren entwickelt und eingesetzt. Die umfangreichen Vorteile der additiven Fertigungsverfahren werden nicht mehr nur im ursprünglichen Einsatzgebiet des Rapid Prototyping verwendet; auch das Interesse der klassischen Serienproduktion wächst infolge der steigenden Möglichkeiten. Hierbei steht die Substitution aktueller Herstellungsprozesse hinsichtlich Flexibilität, Kosten und Integrationsdichte im Vordergrund. Vor allem im Bereich der additiven Metallisierung sind in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt worden. Druck-, Laser- und Plasmatechnologien standen hierbei im Fokus und bieten aktuell ein breites Portfolio an möglichen Anwendungen. [4; 13; 14; 15; 16]

Der Ink-Jet-Druck und das Aerosol-Jet-Verfahren (AJ-Verfahren) zählen zu den wichtigsten Vertretern aus dem Bereich der tintenbasierten Drucksysteme zur additiven Metallisierung von flexiblen oder dreidimensionalen Substratmaterialien. Ein breites Spektrum an Tintensystemen (leitfähig, halbleitend, isolierend, lichtleitend) und die nahezu unbegrenzte Vielfalt an bedruckbaren Substratmaterialien (Thermoplaste, Duroplaste, Keramiken, Halbleiter, Gläser, Textilien) ermöglichen beiden Technologien den Einsatz in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen (z. B. Konsumelektronik, Telekommunikation, Beleuchtung). Sind es bei Ink-Jet, aufgrund der sehr guten Serientauglichkeit durch Reihen- oder Parallelschaltung mehrerer Drucksysteme und der begrenzten 3D-Fähigkeit, vor allem hochvolumige planare Anwendungen, so zielt das AJ-Verfahren auf komplexe dreidimensionale Anwendungsbereiche (z. B. MID) ab. [17; 18; 19]

Die steigende Nachfrage nach Integrationsdichte und Miniaturisierung stellte in der letzten Dekade einen wichtigen Grund für die Weiterentwicklung der Laserstrukturierung dar. Die Subtraktiv- und Semiadditivtechnik sind durch die additive Laserdirektstrukturierung ergänzt worden. Vor allem das LPKF-LDS<sup>®</sup>-Verfahren entwickelte sich zu einer der zentralen Fertigungstechnologien im Bereich der Telekommunikation [6; 20; 5; 21]. Es verbindet die klassischen Vorteile des Lasers, Flexibilität, 3D-Fähigkeit und Großserientauglichkeit, mit der Möglichkeit additiv strukturierte Metallschichten auf komplexen dreidimensionalen Substratkörpern zu erzeugen. Hierbei werden die strukturierten Substratoberflächen (Thermoplaste, Duroplaste, Lacksysteme) in einer nachgelagerten chemischen und unter Umständen galvanischen Metallisierung standardmäßig mit einem Kupfer-Nickel-Gold-Schichtaufbau hergestellt. Aktuelle Applikationen in der Kommunikationstechnik, der Automobiltechnik, der Medizintechnik und der Industrieelektronik untermauern die Anwendungsvielfalt und Potentiale der Technologie. Infolge der anhaltenden Material- und Anlagenentwicklungen gewinnen neue Einsatzgebiete, wie die Beleuchtungstechnik und die Leistungselektronik, immer mehr an Interesse. [4; 5]

Reinigen, Aktivieren und Beschichten stellen bereits seit Jahrzehnten die Hauptanwendungsgebiete der Plasmatechnik dar. Beispielsweise wären eine einfache Metall-Kunststoffverbindung oder ein Verkleben von Kunststoff-Komponenten im Automobilbau ohne Plasmaaktivierung heutzutage kaum oder nur eingeschränkt auf spezielle Materialkombinationen möglich. Analog zu den genannten Entwicklungen in der Druck- und Lasertechnik kristallisierten sich in den letzten Jahren auch im Bereich der Plasmatechnik neue Verfahren zur strukturierten additiven Metallisierung heraus. Flamecon® [22], Plasmacoat® [23] und Plasmadust® [24] stellen hierbei die wichtigsten Vertreter aus dem Bereich der Atmosphärenplasmen dar. Verglichen mit den genannten Druck- und Lasertechnologien bieten diese Verfahren grundsätzlich andere Vor- und Nachteile. Zählen Schichtdicken im Bereich von 100 µm oder mehr kombiniert mit einer einfachen und kurzen Prozesskette zu den Stärken, so sind Grenzen in der Miniaturisierung und thermische Belastbarkeit bei der Beschichtung den Schwächen zuzuordnen. Nichtsdestotrotz gewinnt die Plasmatechnik immer mehr an Interesse, was deutlich auf die Limitierung der Schichtdicken der Druckverfahren und der Laserdirektstrukturierung, speziell für Anwendungen im Bereich der Beleuchtungs- und Leistungselektronik, zurückzuführen ist. Plasmatechnologien können die erforderlichen Leiterquerschnitte realisieren, um die entsprechenden Ströme zu übertragen. Zusätzlich können die komplexen und kostenintensiven Prozesse der chemischen bzw. galvanischen Metallisierung vermieden werden. Im Folgenden werden der aktuelle Stand der Plasmatechnik und die Möglichkeiten der genannten Verfahren hinsichtlich additiver Metallisierung vorgestellt. [25; 26]

### 2.1 Thermisches Spritzen

Das thermische Spritzen stellt die Hauptgruppe der additiven Beschichtungstechnologien dar. Ihm sind mehrere Verfahren untergeordnet, welche ein Abscheiden unterschiedlicher Werkstoffe (Metalle, Legierungen, Oxide, Carbide) auf Baugruppen zur Generierung spezifischer Eigenschaften (Korrosionsschutz, Verschleißschutz, elektrische oder magnetische Eigenschaften) ermöglichen. Eine weitere Untergliederung kann nach DIN EN 657 erfolgen. Hierbei wird eine Einteilung der Verfahren nach der verwendeten Energiequelle vorgenommen. Plasmatechnologien sind der Untergruppe „Thermisches Spritzen durch elektrische Gasentladung“ zuzuordnen. Abbildung 1 zeigt einen Überblick über die Verfahren des thermischen Spritzens. Die grundsätzliche Funktionsweise ist bei allen Technologien identisch. Der Spritzwerkstoff wird in Pulver-, Draht- oder Stabform durch thermische Energie innerhalb oder außerhalb der Beschichtungsdüse an-, auf- oder abgeschmolzen und mit Hilfe des Gasstromes auf die Substratoberfläche befördert. Das Kaltgasspritzen, Flamspritzen, Lichtbogenspritzen und Plasmaspritzen stellen derzeit die industriell relevantesten Verfahren dar. Neben dem großen Portfolio an verwendbaren Beschichtungswerkstoffen zeichnen sich die genannten Spritzverfahren durch eine geringe thermische Belastung des Substratmaterials, die Möglichkeit der partiellen Beschichtung und hohe Abscheideraten aus. Neben dem technischen Vorteil der Funktionalisierung herkömmlicher Substratmaterialien und des wirtschaftlichen Ein-

sparungspotentials durch Substitution teurer und aufwändiger Subtraktivverfahren werden auch interdisziplinär neue Applikationsmöglichkeiten geschaffen. So können beispielsweise die mechanischen Eigenschaften eines thermoplastischen Kunststoffes mit den elektrischen eines Metalls infolge einer Beschichtung kombiniert werden. [27; 28]

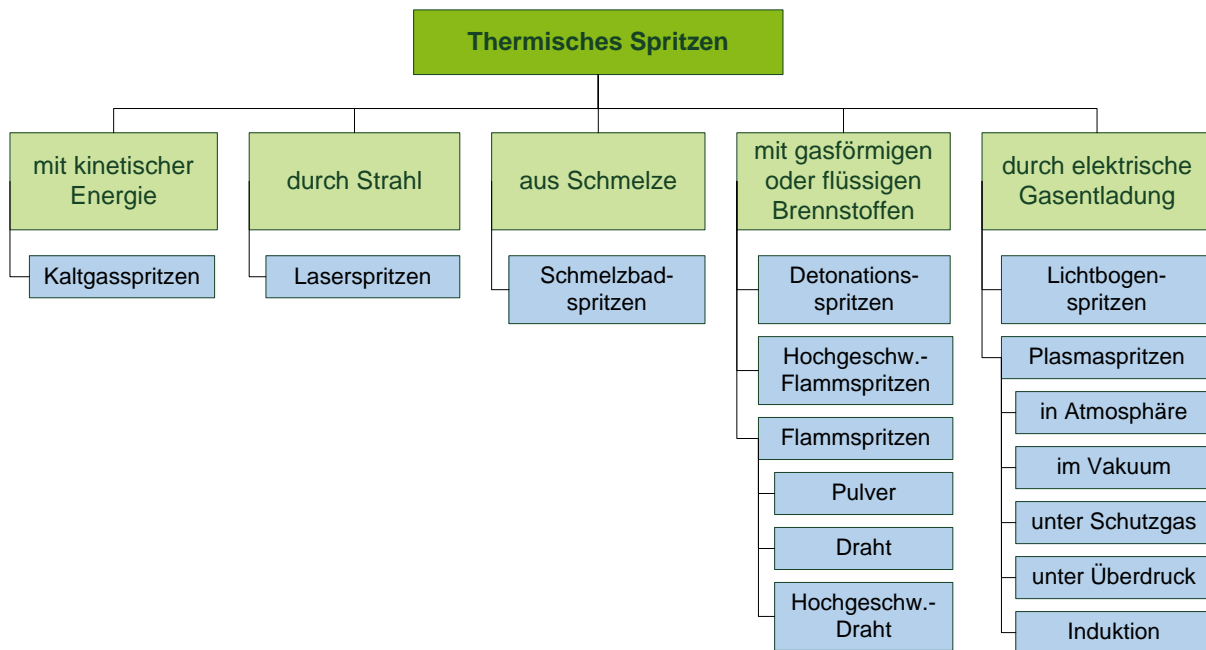


Abbildung 1: Einteilung des thermischen Spritzens nach DIN EN 657 [27; 29]

Im Folgenden werden die wichtigsten Beschichtungsverfahren kurz angeführt, um eine klare Abgrenzung des Plasmaspritzens, insbesondere der Atmosphärenplasmen, zu gewährleisten.

### 2.1.1 Kaltgasspritzen

Beim Kaltgasspritzen werden hohe kinetische Energien genutzt, um Metallpartikel mit einem Durchmesser von 5 - 25  $\mu\text{m}$  extrem stark zu beschleunigen und diese anschließend mit einer hohen Geschwindigkeit (bis zu 600 m/s) auf die Substratoberfläche prallen zu lassen. Infolge des Aufschlags bilden die Partikel unter geeigneten Bedingungen eine haftende Schicht mit niedriger Porosität aus. Der Haftmechanismus kann, abhängig vom Substratmaterial, entweder als mechanische und/oder chemische Bindung angesehen werden. Die hohe Geschwindigkeit der auftreffenden Partikel ermöglicht bei weichen Materialien (Kunststoffen, ausgewählten Metallen) ein Eindringen in die Substratoberfläche und folglich ein Verzahnen der Partikel mit der Oberfläche. Eine Beschichtung harter Materialien unterliegt rein chemischen Bindungen. Als Prozesseinflussgrößen können das verwendete Prozessgas (Druck, Temperatur), die Düsengeometrie und die Beschaffenheit der Partikel (sphärisch, Korngrößenverteilung) angeführt werden. Der Verzicht auf thermische Energie und die somit weder an- noch aufgeschmolzenen Partikel stellen die Besonderheit des Verfahrens dar. Aktuell verfügbare Anlagentechniken können sich

im Aufbau unterscheiden, bieten aber die gleiche Funktionsweise. Gasversorgung, Pulverförderer, Spritzpistole mit Vorkammer und eine Beschleunigungsdüse bilden die Hauptbestandteile. Ein auf mehrere 100 °C vorgeheiztes Prozessgas begünstigt die Verformung der einzelnen Partikel beim Aufprall. Die erzeugten Schichten weisen eine geringe Oxidation, eine hohe Härte, geringe Eigenspannungen und kaum Verunreinigungen auf. Zudem sind die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Schicht mit denen des Beschichtungswerkstoffs vergleichbar. [30; 31]

### 2.1.2 Flammspitzen

Das vollständige Aufschmelzen des Beschichtungswerkstoffes mit Hilfe einer Brenngas-Sauerstoffflamme stellt den zentralen Prozessschritt des Flammsspritzens dar. Die Auswahl des Brennstoffes (Acetylen, Propan, Wasserstoff) ist abhängig von der Schmelztemperatur des Schichtmaterials. Hierbei können Temperaturen von maximal 3160 °C (Acetylen-Sauerstoff-Verbrennung) erreicht werden. Die Abscheidung der geschmolzenen Partikel auf die Substratoberfläche erfolgt durch die Kombination des expandierenden verbrennenden Gases und einer zusätzlichen Druckluftquelle. Aufgrund der relativ großen Entfernung zur Flamme (100 - 200 mm) erfolgt eine maximale thermische Belastung des Substrats von ca. 250 °C, welche durch optionale Kühlung meist zusätzlich verringert wird. Die größte Anwendung findet das Flammsspritzen bei Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten. Eine hohe Haftzugfestigkeit und Dichte sind hierbei entscheidend. Einen weiteren Vorteil bieten die Verarbeitungsmöglichkeit von Drähten, Stäben und Pulvern und die Erzeugung von Legierungen aller Art (Metalle, Karbide, Oxide). [27; 31; 32]

### 2.1.3 Lichtbogenspritzen

Das Lichtbogenspritzen und das Lichtbogenschweißen sind prozesseitig miteinander vergleichbar. Zwei bis vier Metalldrähte gleicher oder unterschiedlicher Art werden mit konstanter Geschwindigkeit in die Spritzpistole eingeführt, worin sie sich aufeinander zubewegen. Kontaktgebende Drahtführungen prägen einen konstanten Strom in die Drähte ein, welcher kurz vor dem Kontakt der Drahtspitzen infolge des hohen Kurzschlussstromes einen Lichtbogen zündet. Mit Hilfe der thermischen Energie (maximal 6500 °C) wird der Beschichtungswerkstoff aufgeschmolzen und durch einen in der Düse befindlichen Gasstrom auf die Substratoberfläche befördert. Die hohe Temperatur führt häufig zu einem Abbrand von Legierungselementen an den Drahtenden und zu einer erhöhten Oxidation der geschmolzenen Partikel. Der hohe Materialauftrag, die Verarbeitung jeglicher Art von Metallen oder Legierungen und die ausgezeichnete Wirtschaftlichkeit des Verfahrens spiegeln sich in zahlreichen Anwendungsgebieten wieder. Korrosions- und Verschleißschutz, Reparatur infolge von Verschleißschäden, Metallisierung von Kunststoffgehäusen und Haftgrundschichten für spätere Keramikschichten sind nur einige Einsatzgebiete des Lichtbogenspritzens. Als nachteilig sind die häufigen Wartungsarbeiten des Brenners zu nennen. Hierbei ist je nach verwendeten Parametern (Lichtbogenstromstärke, Drahtvorschubgeschwindigkeit, Verschmutzung des Drahtes und der Zuführung) eine defi-

nierte Reinigung bzw. ein Austausch einzelner Komponenten erforderlich. [27; 31; 32]

#### 2.1.4 Plasmaspritzen

Aktuell stellt das Plasmaspritzen das Verfahren mit der höchsten Anwendungsvielfalt dar. Das große Portfolio an Beschichtungs- und Substratwerkstoffen, die gute Automatisierbarkeit, kaum Einschränkungen in der Bauteilgeometrie und die zahlreichen Verfahrensvarianten machen das Plasmaspritzen einzigartig. Abhängig von der jeweiligen Variante ergeben sich spezifische Vor- und Nachteile. Beispielsweise ermöglicht atmosphärisches Plasmaspritzen eine Beschichtung unter normalen Umgebungsbedingungen ohne Schutzgasatmosphäre oder Vakuum und somit einen einfachen und kostengünstigen Aufbau in einer herkömmlichen automatisierten Bearbeitungszelle. Nachteilig kann sich jedoch die Oxidation infolge des Sauerstoffs in der Luft auswirken. Um dies zu vermeiden, bietet sich das Vakuumplasmaspritzen an, welches in einer evakuierten und mit Inertgas gefluteten Kammer betrieben wird. Die Erzeugung eines Lichtbogens, welcher anschließend ein vorbeiströmendes Gas ionisiert und in den Plasmazustand versetzt, bildet den Kern des Funktionsprinzips. An der Austrittsmündung der Plasmadüse wird ein Pulver in das ionisierte Gas, welches je nach Arbeitsgas Temperaturen von bis zu 20.000 °C erreichen kann, eingeblasen und infolge von Impulsübertragung an- bzw. aufgeschmolzen. Die Beschichtung erfolgt aufgrund der kinetischen Energie des Gasstromes, welcher die Partikel in Richtung Substratoberfläche beschleunigt. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in Kapitel 2.2.1. Ähnlich dem Lichtbogenspritzen gibt es zahlreiche Anwendungsgebiete. Die Möglichkeit gezielt spezielle thermische, elektrische oder tribologische Eigenschaften zu generieren, in Verbindung mit Schichtdicken von wenigen Mikrometern bis zu 500 µm, macht den Einsatz des Plasmaspritzens in unterschiedlichen Bereichen interessant. Zudem können Plasmaflammen ohne Pulverzufuhr auch für Aktivierungs- oder Reinigungszwecke verwendet werden. Der Plasma-brenner bildet das Zentrum der Anlage. Zusätzlich werden Kontrolleinheit, Medienversorgung (Gas, Strom, Wasser, Druckluft), Pulverförderer, Handhabungseinheit und eine Bearbeitungszelle benötigt. Die Eigenschaften der generierten Schichten werden durch eine komplexe Kombination der verschiedenen Prozessparameter (Geschwindigkeit und Temperatur der auftreffenden Partikel, Relativbewegung von Plasmadüse und Substrat) beeinflusst. Beispielsweise ist eine gezielte Erzeugung poröser oder dichter Schichten möglich. [27; 28; 31; 32] Eine detaillierte Ausführung erfolgt in Kapitel 2.2.3.

Zusammenfassend weisen alle genannten Verfahren spezifische Vor- und Nachteile, basierend auf ihrem Funktionsprinzip auf. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die genannten Verfahren bezogen auf ihre Arbeitstemperatur und Beschichtungsgeschwindigkeit. Beide Faktoren sind verantwortlich für den Umfang des möglichen Materialportfolios, sowohl der möglichen Beschichtungs- als auch der Substratwerkstoffe. Während das Lichtbogen- und Flammsspritzen hauptsächlich hohe therm-

ische Energien und somit komplett aufgeschmolzene Partikel für den Schichtauftrag verwenden, machen sich das Plasmaspritzen und speziell das Kaltgasspritzen die Kombination aus kinetischer und thermischer Energie zu Nutze. Der Hauptunterschied liegt bei beiden Herangehensweisen in der thermischen Belastung des Substratmaterials und der Ausbildung der generierten Schichten. Bei erst genannten Verfahren (Lichtbogen- u. Flamspritzen) entstehen wesentlich höhere Temperaturen an der Substratoberfläche. Gleichzeitig erfolgt aufgrund dessen eine gute Vernetzung der Partikel, sowohl an der Substratoberfläche, als auch zwischen den Partikeln selbst, was eine hohe Dichte und gute Haftzugfestigkeit der erzeugten Schicht ermöglicht. Die hohen Aufprallgeschwindigkeiten beim Kaltgasspritzen bieten den Vorteil der geringen thermischen Belastung des Substrats, haben aber eine hohe mechanische Belastung aufgrund der Deformation der auftreffenden Partikel zur Folge.

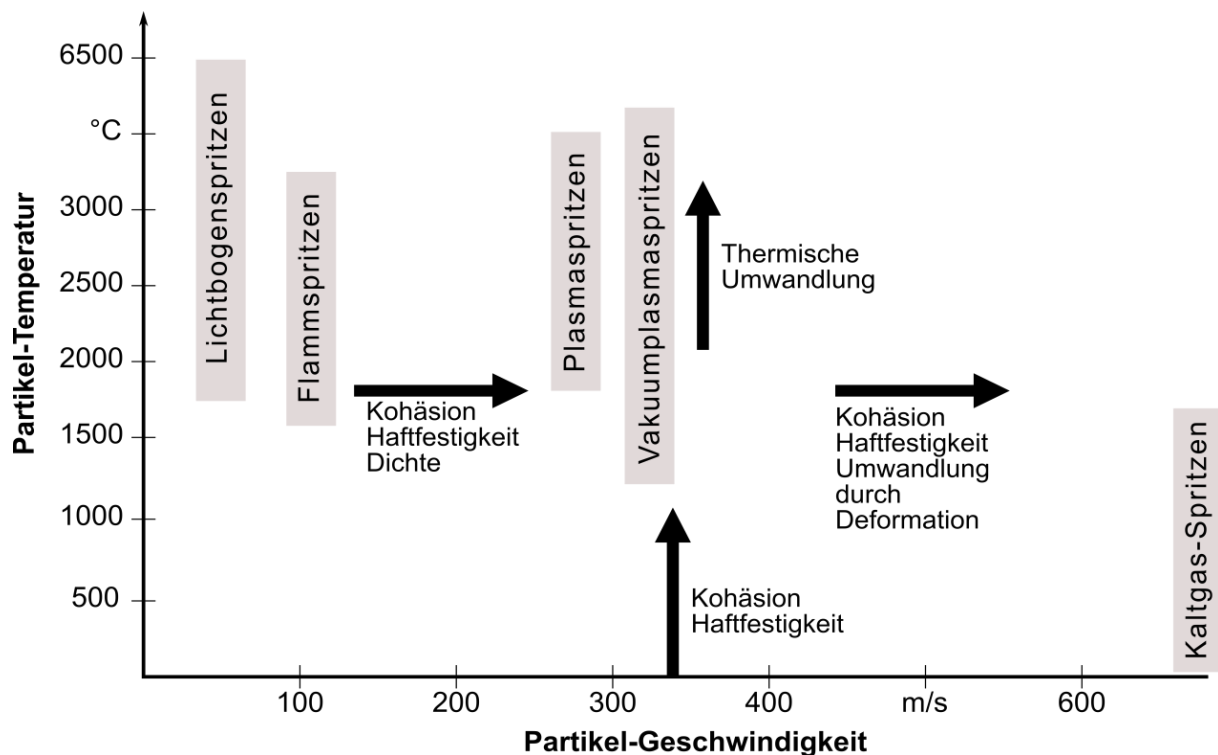


Abbildung 2: Einteilung der Beschichtungsverfahren abhängig von Temperatur und Geschwindigkeit der Partikel nach [27; 31]

Grundsätzlich können Haftzugfestigkeit und Dichte gespritzter Schichten durch thermische oder kinetische Energie beeinflusst werden. Folglich bestimmen das Einsatzgebiet, der Spritzwerkstoff und die Substrateigenschaften die Auswahl des Beschichtungsverfahrens. Das Plasmaspritzen, speziell die in dieser Arbeit behandelte Kaltaktive Plasma-Metallisierung (Cold-Active Plasma-Metallization, CAPM), bietet aufgrund seiner Kombination aus Temperatur und Geschwindigkeit der Partikel vielfältige Möglichkeiten. Vor allem die Funktionalisierung thermisch sensibler Werkstoffe wie Thermoplaste, aber auch die Eignung für Keramiken und Halbleiter, machen das

Verfahren technisch und wirtschaftlich interessant. Im Weiteren werden Funktionsweise und Eigenschaften der Technologie ausführlich beleuchtet.

## 2.2 Strukturierte Metallisierung mit CAPM

Für ein Verständnis der CAPM-Technologie, ein Definieren möglicher Einsatzgebiete und ein Ableiten von Handlungsfeldern sind grundlegende physikalische Zusammenhänge der Plasmatechnik notwendig. Folgend werden die Möglichkeiten der Plasmaerzeugung und deren Einfluss auf den Beschichtungsprozess näher betrachtet.

Das CAPM-Verfahren kann allgemein als dreistufiger Energietransferprozess verstanden werden (siehe Abbildung 3). Im ersten Schritt wird die Energie eines elektrischen Feldes durch Ionisation auf ein Gas übertragen. Anschließend erfolgt ein Transfer von Wärme- und Stoßenergie des Gases auf die eingespeisten Pulverpartikel. Als letztes findet eine Übertragung thermischer und kinetischer Energie des Pulver-Gas-Gemisches auf die Substratoberfläche statt. [28]

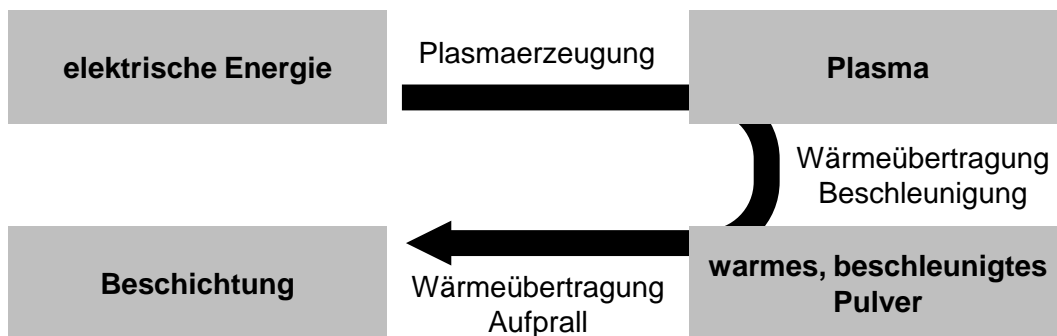


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung des Energietransfers während des Plasmabeschichtungsprozesses [28]

### 2.2.1 Plasmaerzeugung und Energieübertragung auf das Trägergas

Der Begriff Plasma wurde 1928 von Irving Langmuir geprägt und wird im technischen Umfeld meist als vierter Aggregatzustand bezeichnet. [33] Eine kontinuierliche Energiezufuhr bedingt den Übergang von fest über flüssig in gasförmig und schließlich in den Plasmazustand. Ein hochenergetisches Gas wird als Plasma betrachtet, wenn es eine elektrische Neutralität gegenüber seiner Umgebung aufweist, d. h. die Anzahl an Elektronen und Protonen identisch ist. Zusätzlich sorgen sogenannte freie Ladungen (Elektronen, Ionen) für eine elektrische Leitfähigkeit, welche zu einer starken Interaktion der Bestandteile untereinander und gegenüber elektromagnetischen Strahlungen führt. Elektronen können so durch elektrische Felder beschleunigt werden. Bei einer Kollision mit schweren Partikeln geben sie Energie ab, können diese bei einer ausreichenden Energiezufuhr aber wieder angleichen. [34; 35; 36] In der Thermodynamik werden zwei Arten von Plasma unterschieden, das Gleichgewichts- und das Nichtgleichgewichtsplasma. Letzteres wird auch als Niedertemperatur oder kaltes Plasma bezeichnet. Der Hauptunterschied liegt in der Dichte und Energie der Teilchen. In einem Gleichgewichtsplasma haben Elektronen, Ionen, Radikale etc. die gleiche kinetische Energie und somit eine identische Temperatur.



Eine technische Relevanz bilden hier nur Plasmen, die sich lokal und nicht vollständig im thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Erstere, thermische Plasmen genannt, werden meist industriell eingesetzt und können bei Atmosphärendruck im Inneren 30.000 K erreichen. Letztere sind beispielsweise nur in Sternen zu finden. Bei Nichtgleichgewichtsplasmen ist die kinetische Energie der schweren Teilchen (Atome, Moleküle, Ionen, Radikale) um einige Größenordnungen niedriger als die der Elektronen. Dies hat zur Folge, dass nur die Elektronen Temperaturen von 10.000 K oder mehr erreichen und somit die Gesamttemperatur der Nichtgleichgewichtsplasmen gegenüber Gleichgewichtsplasmen wesentlich geringer ist. [33; 34; 36; 37]

Eine weitere Unterteilung kann in Atmosphären- und Niederdruckplasma getroffen werden. Ein Atmosphärenplasma weist gegenüber einem Niederdruckplasma grundsätzlich vier verschiedene Eigenschaften auf:

- elektromagnetische Beeinflussung erschwert
- begrenzte Ausbreitung des Plasmastrahls
- niedrige Ionenenergie
- Erzeugung gefährlicher Nebenprodukte

Erst- und zweitgenanntes können auf die reduzierte mittlere freie Weglänge in Atmosphärenplasmen zurückgeführt werden. Diese erlaubt nur eine bedingte Kontrolle der Auslenkung des erzeugten Plasmas durch elektromagnetische Felder. Des Weiteren bedingt die kurze mittlere freie Weglänge einen geringen Einflussbereich des Plasmas. Folglich werden Atmosphärenplasmen mit einer hohen Gasflussrate oder mehreren parallel angeordneten Plasmadüsen betrieben, um eine Bearbeitung großflächiger Baugruppen zu ermöglichen. Das kontinuierliche Einbringen der elektrischen Energie in die freien Elektronen, verbunden mit einer hohen Kollisionsfrequenz im Plasma, führt zu einer niedrigen Ionenenergie und unterbindet somit die vom Physical Vapor Deposition (PVD) bekannten Ionen-Ätzprozesse, was eine reduzierte Beeinflussung der chemischen Bindungen an der Substratoberfläche zur Folge hat. Dies wiederum beeinflusst die Schichthaftung. Die Nutzung des Trägergases Stickstoff verbunden mit natürlicher Umgebungsluft kann beim Atmosphärenplasma zur Erzeugung gefährlicher Nebenprodukte wie Lachgas, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon führen, was eine gekapselte Einhausung mit einer entsprechenden Frischluftzufuhr und Absaugung notwendig macht. [28; 36]

Der Plasmabeschichtungsprozess ist stark vom verwendeten Trägergas abhängig. Aktuell werden hauptsächlich Stickstoff ( $N_2$ ), Wasserstoff ( $H_2$ ), Argon (Ar) und Helium (He) verwendet. Abbildung 4 zeigt deutlich, inwiefern das jeweilige Trägergas einen Einfluss auf die Gastemperatur, die Ionisationsenergie und die Plasmageschwindigkeit hat. Die Energie der Gase nimmt durch Dissoziation (Aufspaltung der Atome) oder Ionisation (Abspalten von Elektronen) bei konstanter Energiezufuhr unterschiedlich stark zu. Beispielsweise führt eine Verwendung von Edelgasen (Argon, Helium) bei gleicher Energiezufuhr im Vergleich zu Molekülgasen (Stickstoff, Wasserstoff) zu

einer erheblich höheren Gastemperatur. Verbunden mit einer stärkeren thermischen Expansion der Edelgase kommt es zusätzlich zu einem größeren Druck und folglich einer höheren Plasmageschwindigkeit. Stickstoff und Wasserstoff bieten den Vorteil selbst bei geringen Temperaturen große Energieinhalte speichern zu können. Des Weiteren geben sie ihre Wärmeenergie innerhalb des Plasmastrahls langsamer an die Umgebung ab, was eine bessere Energieübertragung auf die eingespeisten Pulverpartikel ermöglicht. Zusammenfassend gelten Edelgas-Plasmen als kalt und schnell, Molekülgas-Plasmen sind dagegen heiß und langsam. [27; 28; 38]

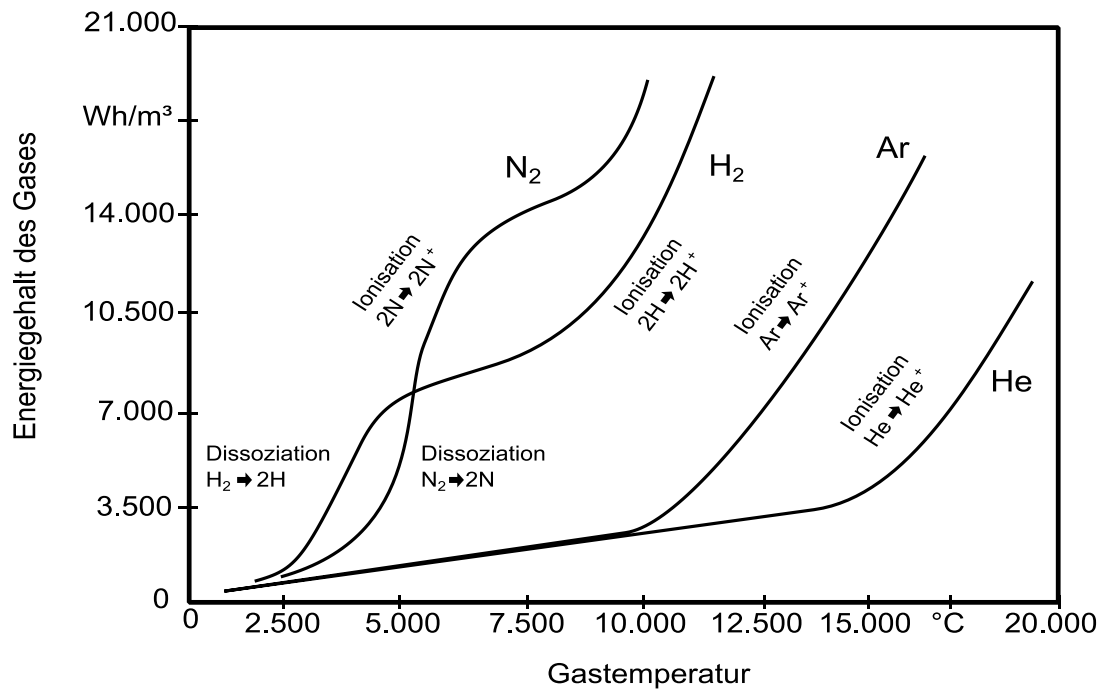


Abbildung 4: Temperaturabhängigkeit des Trägergases von der Enthalpie nach [27]

Neben dem Plasmagas weisen Gastemperatur und Gasgeschwindigkeit eine Abhängigkeit von der verwendeten Plasmadüse auf. Bei turbulenten Plasmadüsen ist die Gastemperatur unmittelbar nach Austritt aus der Düse am größten, fällt folgend aber innerhalb weniger mm um mehrere 1.000 K ab. Ein ähnliches Verhalten ist für die Gasgeschwindigkeit auszumachen. Ab Düsenaustritt bis ca. 15 mm Abstand ist kaum ein Abfall festzustellen. Anschließend ist eine Reduzierung von ca. 360 m/s auf 100 m/s über eine Strecke bis ca. 120 mm zu beobachten. Beide Einflüsse sind jeweils gemeinsam und in Abhängigkeit des anliegenden Gasdruckes und Düsendurchmessers zu betrachten. Laminare Plasmadüsen, sogenannte deLaval-Düsen, erreichen Gasgeschwindigkeiten von mehr als 800 m/s. Zudem findet aufgrund des quasi-laminaren Gasstrahls nur eine geringe Interaktion der Pulverpartikel mit der Umgebungsluft statt, was eine geringe Oxidation und eine höhere Temperatur der Partikel beim Aufprall auf die Substratoberfläche bedingt. [28]

Grundsätzlich kann ein Gas nach vier verschiedenen Energieübertragungsverfahren ionisiert werden: durch Wärme, Kompression, Strahlung und elektrischen Strom. Für diese Arbeit stellt nur die Plasmaerzeugung durch elektrischen Strom eine Relevanz

dar. Hierbei kann eine Unterteilung in Gleichstrom (DC), Wechselstrom (AC) und Impulsstrom erfolgen. AC deckt den herkömmlichen technischen Frequenzbereich bis hin zu Mikrowellen- und Gammastrahlung ab. Der Energietransfer erfolgt meist indirekt, indem Gas und Elektroden durch einen Isolator getrennt sind. Bei DC wird die elektrische Energie, abhängig von der Stromstärke, entweder mittels Glimm- oder Lichtbogenentladung direkt auf das vorbeiströmende Gas übertragen. Die Glimmentladung erfolgt bei sehr niedrigen Strömen (0,1 bis 100 mA) und wird hauptsächlich zu Analyse Zwecken von dünnen Oberflächen in der optischen Spektroskopie eingesetzt. Für Plasmabeschichtungsverfahren werden, abhängig von der Schmelztemperatur des Pulvers, höhere Ströme benötigt. Hierfür sind mehrere mögliche Anlagenvarianten verfügbar:

- elektrodengestütztes Plasma
- elektrodenloses Plasma
- hybrides Plasma

Die elektrodengestützten Plasmen können wiederum in verschiedene Wirkprinzipien unterteilt werden (siehe Abbildung 5). Bei der klassischen Plasmadüse (indirekter Plasmaerzeuger) ist keine elektrische Verbindung zwischen Kathode und Werkstoff gegeben, wodurch die elektrische Leitfähigkeit des Plasmas auf den Innenraum der Düse begrenzt ist. Eine elektromagnetische Beeinflussung des Plasmastrahls nach Austritt aus der Düse ist kaum möglich. Indirekte Plasmaerzeuger können Leistungen von bis zu 600 kW erreichen, was ein Auf- bzw. Anschmelzen metallischer Partikel ermöglicht. Direkte Plasmaerzeuger weisen entweder eine elektrische Verbindung zwischen Kathode und Substratoberfläche oder Kathode und Zwischenelektrode auf. Die elektrische Kopplung des Substrats hat sehr hohe Beschichtungstemperaturen zur Folge, was meist durch eine aktive Kühlung kompensiert werden muss. Die Pulverzufuhr ist aufgrund möglicher Verschmutzung der Elektroden nicht trivial, weshalb Beschichtungen mit direkten Plasmaerzeugern meist die Nutzung einer Zwischenelektrode bevorzugen. Bei dieser Variante werden rotierende selbstreinigende Carbonelektroden verwendet, was eine hohe thermische Effizienz und somit eine um bis zu neunfach höhere Pulvermenge im Vergleich zu normalen Plasmaerzeugern erlaubt. [28]

Bei elektrodenlosen Plasmaerzeugern erfolgt die Energieübertragung auf das Trägergas räumlich getrennt durch ein elektromagnetisches Feld mit Hilfe von Induktionsspulen. Folglich ist keine Kontamination des zugeführten Pulver-Gas-Gemisches durch Abnutzung der Elektroden möglich. Eine niedrige Geschwindigkeit des Plasmas (10 - 20 m/s), ein großer Plasmadurchmesser und keine Temperaturlimitierung machen diese Variante von Plasmaerzeugern vor allem für hochschmelzende Metalle und Keramiken für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtstechnik interessant. Eine industrielle Serienanwendung zur Herstellung von Standardkomponenten ist aufgrund der komplexen Prozessführung und der aufwändigen Anlagentechnik wirtschaftlich meist nicht sinnvoll. [28; 39]

Hybride Systeme verbinden die Ionisationsprinzipien von elektrogestützten und elektrodlosen Plasmaerzeugern, um die Vorteile beider Systeme zu kombinieren. Weit verbreitet ist die Kombination aus indirektem Erzeuger mit anschließendem Induktionserzeuger, was eine erhebliche Erhöhung der Energiedichte des Gases und eine Vergrößerung des Plasmastrahldurchmessers zur Folge hat. Einsatz finden solche Systeme bei der Beschichtung von großflächigen Baugruppen, die einen hohen Pulverdurchsatz erfordern. [28]

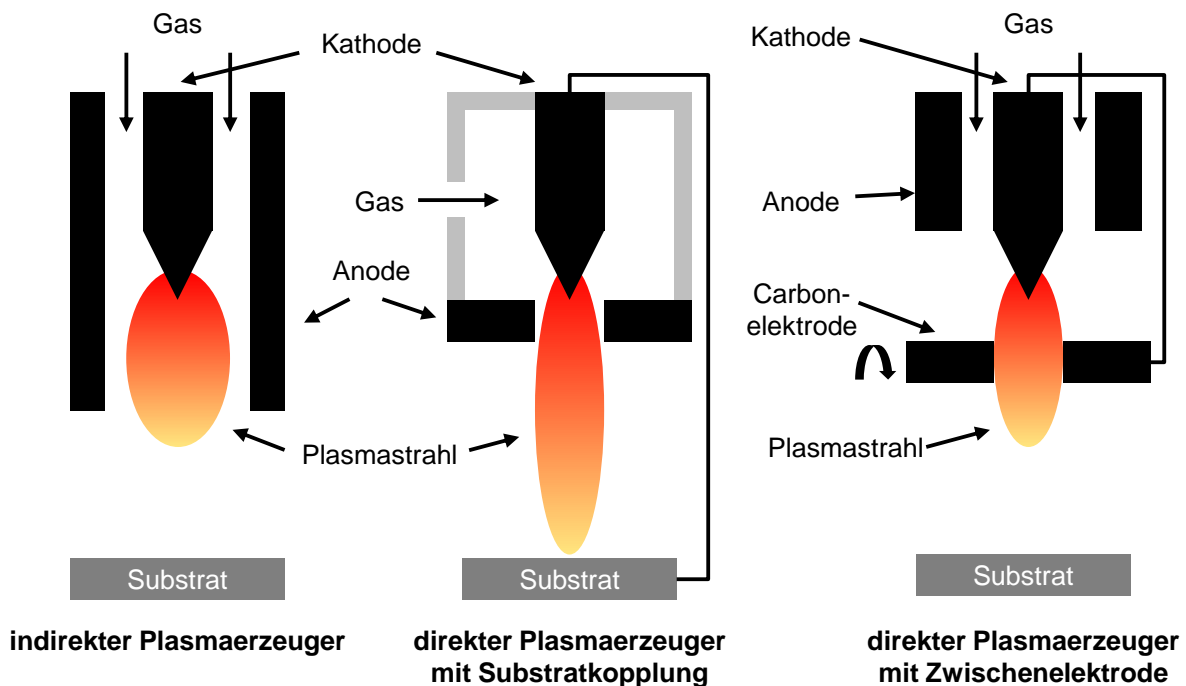


Abbildung 5: Schematische Darstellung unterschiedlicher Varianten an elektrogestützten Plasmaerzeugern nach [28]

### 2.2.2 Energietransfer des Trägergases auf die Pulverpartikel

Grundsätzlich ist beim Plasmaspritzen, ähnlich wie beim Flamm-spritzen, die Verarbeitung von Stäben, Drähten und Pulvern möglich. Industriell relevant und für diese Arbeit entscheidend sind Metallpulver. Pulver sind am Markt in unterschiedlichen Materialien, Größenordnungen (5 nm - 200 µm), Qualitäten und Partikelformen (sphärisch, Flakes) verfügbar. Vor allem die Reinheit und die sphärische Form beeinflussen die Qualität der erzeugten Schicht. Somit ist die Herstellung eine entscheidende Größe bei der Auswahl des Metallpulvers. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Verfahren der Pulvererzeugung angeführt.

#### Mechanische Pulverherstellung

Das Mahlen von Festkörpern kann trocken, nass und unter Schutzgasatmosphäre erfolgen. Spröde Materialien eignen sich besonders, aber auch zähe Metalle, wie z. B. Kupfer und Aluminium, lassen sich mechanisch zerkleinern. Nach einer Grobzerkleinerung in einer Kugel- oder Rohrmühle folgt ein Feinmahlen in einer Schwingmühle. Bei allen Verfahren werden verschleißfeste Hilfswerkstoffe (Hartmetall, Kera-

miken, Porzellan), teilweise verbunden mit Schwingerregern oder Vibration, für die Zerkleinerung der Metalle verwendet. Somit können Teilchengrößen von 1 µm erreicht werden. Großer Nachteil des kostengünstigen Mahlens ist die Kontamination der Pulver durch den Abrieb der Hilfswerkstoffe. Ohne Nachreinigung sind mechanisch hergestellte Metallpulver, vor allem Kupfer, nicht für eine Erzeugung qualitativ hochwertiger Schichten zu empfehlen. [40; 41; 42]

### **Herstellung aus der Schmelze**

Ein weit verbreitetes Verfahren für eine Gewinnung von Metallpulver aus der Schmelze ist das sogenannte Verdüsen. Hierbei wird ein dünner Strahl aus geschmolzenem Metall seitlich mit Hilfe von Druckluft oder Druckwasser extrem abgekühlt und somit Metallpulver generiert. Bei stark oxidierenden Metallen wird ein Inertgas verwendet. Hohe Anforderungen entstehen bei einer gleichmäßigen Größenverteilung der Pulver oder bei höherschmelzenden Metallen. Hauptsächlich Einsatzgebiet stellt die Gewinnung von Roheisenpulver dar. [41; 42]

### **Elektrolytische Herstellung**

Die elektrolytische Gewinnung von Metallpulver hat vor allem für Kupfer eine große Bedeutung. Bei großer Stromdichte wird aus wässrigen Kupfersalzlösungen Kupfer elektrolytisch an einer Kathode abgeschieden. Der gleichzeitig entstehende Wasserstoff lockert den Niederschlag auf und sorgt für eine porös schwammartige Konsistenz. In Feinmühlen wird die Kathode zerkleinert und das Pulver anschließend auf die gewünschte Sieblinie eingestellt. Unter Wasserstoffatmosphäre wird in einer kurzen Rekristallisationsglühung die durch das Mahlen erzeugte Kaltverfestigung beseitigt. Das hiermit erzeugte Kupferpulver ist besonders rein und besitzt hervorragende Sinter- und Presseigenschaften. [41; 42]

### **Herstellung durch Verdampfen und Kondensation**

Das Verdampfen von Metallen durch eine direkte Widerstandsheizung bei Vakuum- oder Intergasatmosphäre und die anschließende Kristallisation ohne Substratoberfläche in derselben Atmosphäre stellen den Kern dieser Herstellungsmethode dar. Die VEROS-Methode (Vacuum Evaporation on Runnig Oil Substrate) und die Inertgas-Kondensation sind zwei typische Verfahren, die für die Herstellung von Feinstpulvern genutzt werden. Bei erst genanntem Verfahren liegt ein Ölfilm vor, der die Bildung von geschlossenen Metallschichten verhindert und gleichzeitig als Suspensionsmittel für die kristallisierenden Teilchen dient. Deren Größe wird mit Hilfe der Verdampfungsbedingungen und der Bewegungsgeschwindigkeit der Kühlfläche geregelt, deren Größe  $\leq 0,01 \mu\text{m}$  beträgt. Die Inertgas-Kondensation stellt die effektivste Möglichkeit der Feinstpulverherstellung dar. Zu Beginn wird die Prozesskammer evakuiert, durch Aufheizen gereinigt, mit Edelgas geflutet und mit Hilfe eines Lasers, Elektronenstrahls oder Widerstandserwärmung die Verdampfung des gewünschten Metalls gestartet. Die physikalische Wechselwirkung (Keimbildung und Koaleszenz) des Metaldampfes mit dem hinzugeführten Edelgas führt zur Bildung

von Teilchen, deren Größe durch die Verdampfungsintensität und den Edelgaspartialdruck beeinflusst wird. Anschließend kondensieren die Partikel als Metallrauch an der Kühlfläche und fallen als flockige Schichten ab. Nach dem Ausschleusen aus der Prozesskammer kann ein Einlagern der Partikel in einer bewegten Flüssigkeit, dem sogenannten VERL-Verfahren (Vacuum Evaporation on Rotating Liquid), erfolgen, um Agglomeration zu vermeiden. So sind Pulverkörnungen von 5 - 100 nm möglich. Ohne diesen Schritt liegen die Agglomerate bei wenigen Mikrometern. [43; 44]

Zusammenfassend führen die genannten Verfahren zu unterschiedlichen Ergebnissen in Reinheit und Teilchengröße. Für die Verarbeitung von Kupferpulvern sind neben der sphärischen Form und der Größenverteilung im Bereich 5 - 20 µm vor allem eine geringe Oxidation der Kupferpartikel von entscheidender Bedeutung, wodurch eine Verdüsung aus der Schmelze oder eine elektrolytische Herstellung bevorzugt werden. Die betriebswirtschaftlichen Nachteile der VEROS-Methode können durch die hervorragenden Eigenschaften der erzeugten Pulver nicht kompensiert werden. Ebenfalls ist ein rein gemahlenes Kupferpulver, aufgrund der Kontamination durch die Hilfsstoffe, die unregelmäßige Größenverteilung der Pulver und der hohen Oxidation, nicht zu empfehlen.

Wie bereits in Abbildung 3 dargestellt, erfolgt der Energietransfer vom ionisierten Gas auf die Pulverpartikel durch Impuls- und Wärmeübertragung, was eine Beschleunigung und ein Anschmelzen der Partikel bedingt. Im Allgemeinen wird von einem zweistufigen Beschleunigungsprozess der Pulverpartikel ausgegangen. Im ersten Schritt erfolgt eine Geschwindigkeitszunahme durch das Trägergas, welches das Pulver vom Reservoir zur Plasmadüse befördert. Nach Eintritt in das Plasma werden die Partikel erneut beschleunigt. Umso größer die einzelnen Partikel, desto geringer die eingeprägte Beschleunigungsenergie. Gleichzeitig werden kleinere Partikel auf dem Weg zwischen Düsenaustritt und Substratoberfläche stärker durch Wechselwirkungen mit den Atomen der Umgebungsluft abgebremst. Der thermische Energietransfer stellt im Gegensatz dazu einen sehr komplexen Vorgang dar. Vereinfacht kann in Konvektion und Strahlung unterteilt werden. Die eingebrachten Pulverpartikel nehmen Energie der ionisierten Gasteilchen durch Konvektion auf, geben ihrerseits aber wieder Strahlungsenergie an die Umgebung ab. Für eine Simulation bzw. eine mathematische Beschreibung dieses Energieübertragungsprozesses sind entweder Vereinfachungen zu treffen oder komplexe thermodynamische Zusammenhänge zu bewältigen. So wird für die meisten Berechnungen nur eine unrealistisch geringe Menge an Pulverpartikeln angenommen, da hierdurch eine lokale Abkühlung der Plasmaflamme vernachlässigbar ist. Zusätzlich werden Stöße der Pulverpartikel untereinander, thermodynamische Einflüsse auf die Ionisation des Trägergases infolge von Ausgasungsphänomenen injizierter Pulver und optische Emissionen durch kleine Partikel nicht betrachtet. [28]

Im Idealfall durchlaufen die injizierten Metallpulver die komplette Länge der Plasmaflamme, um ein Höchstmaß an thermischer und kinetischer Energie zu absorbieren.

Hierbei spielt der Pulverdruck eine entscheidende Rolle. Dieser muss auf die jeweiligen Trägergasdruck abgestimmt sein. Bei einem zu hohen Pulverdruck kreuzt das eingebrachte Metallpulver das Plasma zu schnell und erfährt nur eine geringe Wärme- und Impulsübertragung. Folglich wird das Metallpulver nicht ausreichend angeschmolzen und, verbunden mit der geringen kinetischen Energie, die Qualität der Beschichtung reduziert. [45; 46]

### 2.2.3 Energietransfer der Pulverpartikel auf die Substratoberfläche

Die Schichtbildung basiert auf dem Energietransfer des Gas-Partikel-Stroms auf die Substratoberfläche. Die angeschmolzenen und beschleunigten Kupferpartikel geben beim Aufprall ihre Wärme- und Bewegungsenergie an die Oberfläche ab. Die entstehende Erwärmung führt zusammen mit dem Anrauen des Substrates durch den ionisierten Gasstrom zur Schichthaftung. Der Aufbau einer Spritzschicht ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

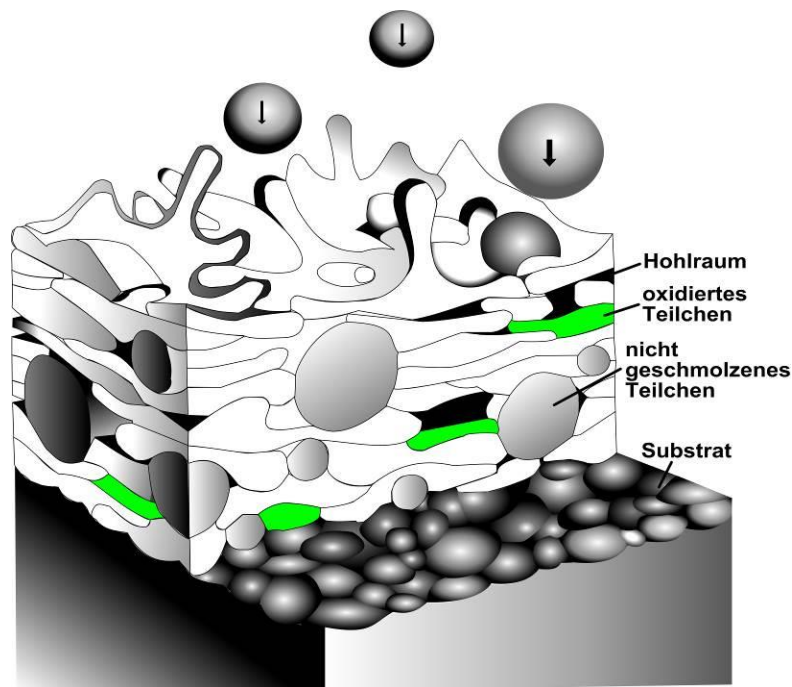


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Schichtbildung [27]

Beim Aufprall der Kupferpartikel auf die Substratoberfläche erfolgt eine plastische Verformung, was zum typischen lammellenartigen Aufbau einer Plasmabeschichtung beiträgt. Die Schichteigenschaften (Porosität, Rauheit, Mikrorissbildung) sind von den verwendeten Prozessparametern (Geschwindigkeit und Temperatur der auftreffenden Teilchen, Relativbewegung von Plasmadüse und Substrat, Substrat- und Schichtkühlung während der Beschichtung), dem Beschichtungswerkstoff und dem Substratmaterial abhängig. Bei Plasmabeschichtungen in normaler Umgebung ist zusätzlich die Oxidation der Metallpartikel während der Flugphase zu beachten. Allgemein ist das Einbetten solcher Oxidschichten der Grund für die lammellenartige Struktur und führt meist zu einer erhöhten Härte und Verschleißbeständigkeit der Schicht, was in vielen Anwendungsbereichen genauso beabsichtigt ist. Bei Kupfer-



schichten vermindert das Oxid allerdings die Leitfähigkeit der erzeugten Strukturen und reduziert zudem die Vernetzung ergo die Haftzugfestigkeit der Partikel untereinander. Abhilfe kann durch das Arbeiten in einer Inertgasatmosphäre ( $N_2$ , Ar) oder die Beimischung eines reduzierenden Prozessgases ( $H_2$ ) geschaffen werden. Die Bildung von Hohlräumen und die Einbettung von nicht-geschmolzenen Partikeln kann auf mehrere Effekte zurückgeführt werden. Eine zu kurze Verweilzeit im Plasma oder eine zu große Wegstrecke zwischen Düsenaustritt und Substratoberfläche führen zu einem unzureichenden Anschmelzen der Partikel. Folglich ist die thermische Energie zu gering, was beim Aufprall eine vollflächige Beschichtung des Grundwerkstoffes erschwert.

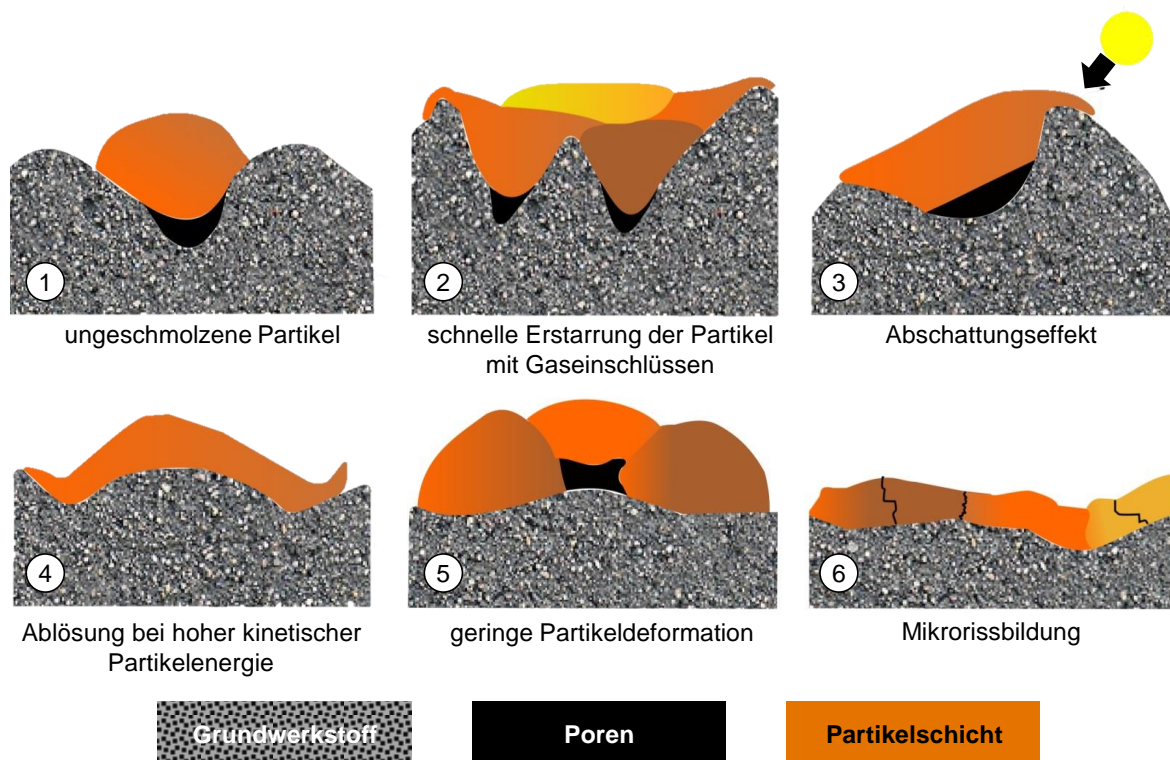


Abbildung 7: Ursachen für Poren- und Rissbildung nach [31]

Die Folge stellt eine Lunkerbildung unter dem Kupferpartikel dar (siehe Abbildung 7 Nr. 1). Ein ähnliches Verhalten ist bei einer ungleichmäßigen Größenverteilung der Partikel in Verbindung mit den gerade genannten Effekten zu erkennen. Wie in Abbildung 7 Nr. 5 schematisch dargestellt, können große Partikel einen Spalt bilden, der bei zu geringer thermischer bzw. kinetischer Energie durch kleine Partikel nicht gefüllt werden kann. Ist der Temperaturgradient zwischen Substratoberfläche und Pulverpartikel zu groß, kann beim Aufprall ein unmittelbares Erstarren eintreten. Das Trägergas kann in diesem Fall nicht mehr entweichen (siehe Abbildung 7 Nr. 2). Abschattungseffekte entstehen meist bei einer nicht orthogonalen Ausrichtung der Plasmadüse zur Substratoberfläche. Eine unvollständige Benetzung der Oberfläche führt hierbei wiederum zu Lufteinschlüssen (siehe Abbildung 7 Nr. 3). Die Mikrorissbildung innerhalb der Kupferschicht kann auf mehrere Gründe zurückgeführt werden (siehe Abbildung 7 Nr. 6). Hauptgrund ist meist ein thermisch induzierter Span-



nungszustand im Zuge des Beschichtungsprozesses. Dieser kann beispielsweise durch eine zu schnelle Abkühlung entstanden sein. Die bereits genannte Oxidbildung zwischen den einzelnen Partikeln kann ebenfalls zur Rissbildung führen.

Die wesentlichen Kenngrößen für die Qualität einer additiven Beschichtung sind die Haftzugfestigkeit (Substrat und Schicht) und die Kohäsion (Schicht und Schicht). Diese können auf folgende Haftmechanismen zurückgeführt werden [27; 28; 47]:

- mechanische Verklammerung
- physikalische Haftung
- chemische Bindung

Eine mechanische Verklammerung ist überwiegend bei rauen Oberflächen der entscheidende Haftmechanismus. Die einzelnen Partikel legen sich an den mikrorauen Strukturen nieder und tragen hiermit zu einer erhöhten Schichthaftung bei. Eine gute Benetzbarkeit des Substrats durch den Beschichtungswerkstoff stellt eine Grundvoraussetzung dar. Die Materialkombination, vor allem die Scherfestigkeit und die Dehnbarkeit der Werkstoffe, beeinflussen die Haftung. Eine physikalische Haftung ist meist bei erhöhten Oberflächentemperaturen, z. B. durch Vorwärmen zu beobachten. Die aufschlagenden Partikel bilden mit der erwärmten Oberfläche eine Diffusionszone aus. Eine gewisse Löslichkeit der beiden Materialien ist hierfür notwendig. Aufgrund der geringen Diffusionstiefe spielt dieser Haftmechanismus nur eine untergeordnete Rolle. Die Oberflächenenergie bzw. -spannung ist der entscheidende Faktor bezogen auf die chemische Bindung (kovalente Bindung). Auch die Ausbildung von chemischen Dipolen (van-der-Waals-Kräfte) tragen zur chemischen Haftung bei. Im Vergleich zur physikalischen Haftung ist der chemischen Haftung eine größere Relevanz zuzuordnen. Vor allem bei der Beschichtung von Kunststoffen spielt die chemische Bindung eine wichtige Rolle. [27; 28; 47]

Neben der Haftung stellen die elektrische Leitfähigkeit und die Zuverlässigkeit der generierten Strukturen eine entscheidende Größe für additive Beschichtungen im Bereich der Elektronikproduktion bzw. der Leistungselektronik dar. Hierbei trägt die Schichtporosität maßgeblich zur elektrischen Leitfähigkeit bei. Die bereits genannte Lunker- und Mikrorissbildung, sowie Oxidschichten oder Kontaminationen, bedingen eine erhöhte Porosität und folglich eine reduzierte elektrische Leitfähigkeit. [28] Die Zuverlässigkeit wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien, induzierte Spannungszustände infolge der Beschichtung und Haftmechanismen zwischen dem Substrat und der Beschichtung sind nur einige Einflussfaktoren. Eine detaillierte Betrachtung der genannten Eigenschaften erfolgt in Kapitel 4.

### 2.2.4 Plasmatechnologien für die additive Beschichtung

Atmosphärendruckplasmen weisen, wie unter 2.1.4. beschrieben, technische und wirtschaftliche Vorteile auf, die einen Einsatz für die additive Metallisierung immer interessanter machen. Folglich sind in den letzten Jahren mehrere Verfahren ent-

wickelt worden, die auf ähnlichen Funktionsprinzipien basieren, prozesstechnisch aber Unterschiede aufweisen.

### **Thermokinetische Plasma-Metallisierung (Thermo-Kinetic Plasma-Metallization, TKPM)**

Das Unternehmen Leoni AG verfolgte bei der Entwicklung einer automatisierten, thermokinetischen Metallisierungslösung, dem sogenannten Flamecon<sup>®</sup>-Verfahren, das Ziel, Kabelbaumstrukturen partiell zu substituieren. Hierzu werden Kupferstrukturen direkt auf dreidimensionale Konturen verschiedener Werkstoffe (Kunststoff, Holz, Keramik, Metall) abgeschieden. Im Prozess werden die Metallpartikel über eine geregelte Dosiereinheit homogen in eine durch Plasma beheizte Kammer geführt, um ein Aufschmelzen zu ermöglichen. Anschließend wird ein Trägergas, sowohl für den Transport zur Beschichtungsdüse, als auch für das Abscheiden selbst, genutzt. Abhängig von den Prozessparametern (Pulverfördermenge, Plasmaenergie, Düsengeometrie) können die Schichtdicke und -breite, wie auch die Eigenschaften der erzeugten Struktur, variiert werden. Die Haftung der Kupferstrukturen ist von mehreren Prozessparametern abhängig. Thermische und kinetische Energie der Partikel beeinflussen ebenso wie der Partikeldurchmesser die Qualität der Schicht. Als Haftmechanismen sind eine mechanische Verklammerung und eine chemische Bindung auszumachen. Für den industriellen Einsatz ist aktuell noch keine marktreife Anlagentechnik verfügbar. [4; 22; 48; 49; 50]

### **Mehrstufige Plasma-Metallisierung (Multi-Level Plasma-Metallization, MLPM)**

Die Firma Plasma Innovations GmbH bietet das neueste am Markt verfügbare Verfahren an. Im Vergleich zu TKPM oder CAPM wird hier ein mehrstufiger Prozess verwendet. Im ersten Schritt werden die Substratoberflächen mit einer Antihaftbeschichtung lackiert, welche anschließend mit einem Laser partiell wieder entfernt wird. Die freigelegten Flächen werden mit dem gewünschten Metall, meist Kupfer, beschichtet. Somit sind Strukturen mit einer maximalen Schichtdicke von 50 µm realisierbar. Die Breite der aufgetragenen Strukturen ist von der Maskierung abhängig, was Strukturen im Bereich von 300 µm ermöglicht. Auch vollflächige Beschichtungen ohne Maskierung können umgesetzt werden. Die Plasmadüse wird durch das Schweizer Unternehmen Medicoat AG zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um eine glockenförmige DeLaval Düse. Als Trägergas wird meist Argon verwendet, andere Prozessgase bzw. Beimischungen sind möglich. Die Plasmazündung erfolgt durch eine Kombination aus sehr hohen Strömen (max. 300 A) und niedrigen Spannungen (max. 25 V). Folglich sind Leistungen von mehr als 6 kW mit der genannten Plasmadüse erreichbar. Das Metallpulver wird kontinuierlich und beidseitig, um 180 Grad versetzt, in die Düse eingeblasen. Je Seite steht ein Pulverförderer zur Verfügung. Der Transport erfolgt über eine oszillierende Förderrinne aus dem Pulverbehälter in das Trägergas. Das sogenannte Fördersystem Flowmotion der Medicoat AG zeichnet sich durch ein sehr gutes Fließverhalten, hohe Förderraten, Wartungsfreiheit und einfache Reinigung aus. [51; 52; 53; 54]

Die geringe thermische Belastung des Substratmaterials, eine hohe Dichte der Schichten und eine variierbare Porosität in Verbindung mit einer serientauglichen Anlagentechnik machen das Verfahren vor allem für eine Anwendung in der Halbleiter-, der MID- und der Antennentechnik interessant. [23; 55; 56]

### Kaltaktive Plasma-Metallisierung (Cold-Active Plasma-Metallization, CAPM)

Das von der Firma Reinhausen Plasma GmbH (heute reylon plasma GmbH) entwickelte sogenannte Plasmadust®-Verfahren wird als atmosphärisches kaltaktives Nichtgleichgewichtsplasma deklariert. Hiermit können die Vorteile eines Atmosphärenplasmas mit denen eines Nichtgleichgewichtsplasmas verknüpft werden, bei welchem die elektrischen Ladungen (Elektronen, Ionen) danach streben, ihre Energie in Form von Impulsübertragung schnellstmöglich wieder abzugeben. Diese Abgabe findet primär an die schweren Metallmoleküle des Beschichtungswerkstoffes statt, wodurch sich die Gasmoleküle des Trägergases nur leicht erhitzen. Eine geringe thermische Belastung der Substratoberfläche ist die Folge. Den zentralen Bestandteil der Anlagentechnik stellt die Plasmadüse (siehe Abbildung 8) dar.

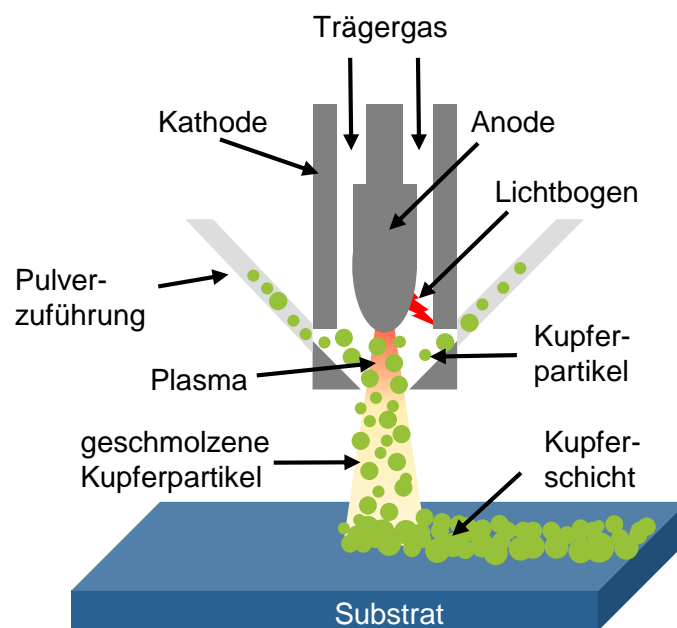


Abbildung 8: Schematische Darstellung des CAPM-Funktionsprinzips [57; 24]

Hier wird das Trägergas durch einen Lichtbogen ionisiert und in den Plasmazustand gehoben. Für die Zündung des Lichtbogens wird ein gepulster Stromgenerator verwendet, was eine niedrigere Gastemperatur und einen geringen Verschleiß der Kathode zur Folge hat. Das verwendete Metallpulver wird beidseitig in die Düse eingeblasen und mit Hilfe des energiereichen Trägergasstroms angeschmolzen und gleichzeitig Richtung Substratoberfläche beschleunigt. Die auftreffenden Partikel gehen mit dem Grundkörper beziehungsweise mit bereits aufgetragenen Schichten eine formschlüssige Verbindung ein. [4; 58; 59] Da eine stetige Abkühlung der Partikel, als auch des Plasmas, nach Verlassen der Düse erfolgt, ist die thermische Belastung für das Substrat sehr gering. Folglich lassen sich mit dem CAPM-Verfahren

ein breites Spektrum an Materialien (Kunststoffe, Halbleiter, Metalle, Keramiken, Holz, Papier, Textilien) beschichten. In Abhängigkeit von den Prozessparametern und den Eigenschaften des Substrates können Schichtdicken von 1 bis 200  $\mu\text{m}$  und Schichtbreiten von 2 bis 5 mm ohne Maskierung erzeugt werden. Mithilfe von Masken, beispielsweise aus Edelstahl oder auf Lackbasis, können Leiterbahnbreiten kleiner 500  $\mu\text{m}$  realisiert werden. [4; 26; 60]

Der einstufige Prozessablauf, das umfassende Materialportfolio (Substrate und Beschichtungswerkstoffe), die variable Schichtdicke, die Verfügbarkeit der Anlagentechnik und die hohe Serienreife stellen die Vorteile im Vergleich zu TKPM und MLPM dar. Im Folgenden werden die verschiedenen Prozessparameter des CAPM-Verfahrens näher betrachtet. Es werden Einflussgrößen auf die Qualität und die Eigenschaften der erzeugten Strukturen definiert und somit ein Überblick über die prozesstechnischen Möglichkeiten und Grenzen geschaffen.

### 2.3 Einflussgrößen auf den CAPM-Prozess

Allgemein können aufgrund der zahlreichen Nichtlinearitäten des Plasmaprozesses auch bei identischen Prozessparametern differierende Ergebnisse beobachtet werden. Minimale Schwankungen der Eingangsparameter können zu erheblichen nichtdeterministischen Änderungen in den Ausgangsparametern führen und somit zu Modulationen der Schichteigenschaften beitragen. Zusätzlich bietet die CAPM-Technologie, bedingt durch ihre große Flexibilität, eine Vielzahl an Prozessparametervariationen unabhängig von diesen allgemeinen Gegebenheiten. In Abbildung 9 ist ein Überblick der Parameter, separiert in vier Hauptgruppen, Substrat, Handhabung, CAPM und Pulver, dargestellt.

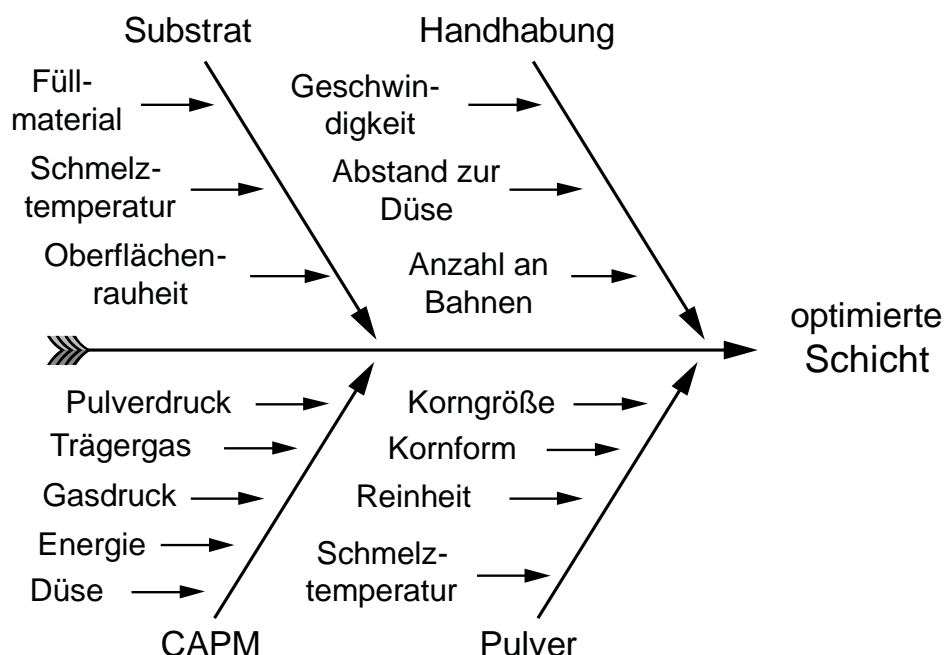


Abbildung 9: Zentrale Einflussfaktoren auf die Qualität der CAPM [58]

Der CAPM-Prozess selbst kann durch fünf Parameter beeinflusst werden. Mithilfe der Energie wird die Bogenentladung und somit die Ionisierung des Trägergases gesteuert. Eine niedrige Energiezufuhr hat eine geringe Plasmaenergie zur Folge. Der Pulverdruck regelt die Menge und Geschwindigkeit des Pulver-Gas-Gemisches vor dem Eintritt in die Plasmadüse. Dieses Gemisch wird von einer Pulvermembranpumpe eingeleitet, welche aus der Zerstäuber- und Fördereinheit die Komponenten bezieht. Oberhalb dieser Einheit befindet sich der Dispergierer, welcher sowohl die Funktion der Dosierung übernimmt, als auch die Agglomerationsbildung der Partikel verhindert. Je größer der Pulverdruck, desto mehr Pulver wird in die Plasmadüse eingeblasen. Gleichzeitig steigt durch den erhöhten Druck die kinetische Energie der einzelnen Pulverpartikel, was eine geringere Verweilzeit in der Plasmaflamme zur Folge hat. Das Plasma selbst ist vom Gasdruck und dem entsprechenden Trägergas abhängig. Der Gasdruck bestimmt die Menge an Gasmolekülen, die in einer definierten Zeit die Düse durchströmen und ionisiert werden können. Umso höher dieser Druck, desto geringer die Ionisierungsenergie pro Gasmolekül, was abhängig von der Wahl des Trägergases ( $N_2$ ,  $H_2$ , Ar, He) mehr oder weniger stark ausfällt (siehe Abbildung 4).

Die Düse stellt den Umgebungskörper aller vorab beschriebener Parameter dar und hat durch ihre Geometrie und das Material Einfluss auf den gesamten Prozess. So kann beispielsweise durch eine aktive Kühlung der Düse die Plasmatemperatur gesenkt bzw. konstant gehalten werden. Die innere Düsengeometrie kann die Gasströmungen beeinflussen, was sich auf die Verweildauer des eingebrachten Pulvers im Plasma oder eine homogene Mischung aus Pulver und Trägergas auswirken kann. Letztlich ist eine Fokussierung des Gas-Pulver-Stromes durch einen entsprechenden Düsenausgang realisierbar. Unter der Voraussetzung, dass stets ein konstantes Prozessumfeld vorliegt und jeweils nur ein Parameter geändert wird, wirken sich alle fünf Parameter auf die Prozesstemperatur aus (siehe Abbildung 10).

Die Handhabung der Substrate kann beim CAPM-Verfahren in drei verschiedene Methoden untergliedert werden. Entweder wird die Baugruppe oder die Plasmadüse am jeweils stationär gelagerten anderen vorbeigeführt oder beide Partner befinden sich in einer gegenseitigen Bewegung zueinander. Unabhängig von der Wahl der Handhabung wirken sich die Geschwindigkeit und der Abstand der Substratoberfläche zur Düse auf das Beschichtungsergebnis aus. Eine höhere Prozessgeschwindigkeit hat eine kürzere Verweilzeit der Substratoberfläche im Plasmastrahl zur Folge, was eine geringere thermische Belastung und eine niedrigere Pulverabscheiderate pro Flächeneinheit bedingt. Eine Zunahme des Abstands zwischen Düse und Substratoberfläche führt ebenfalls zu niedrigeren Oberflächentemperaturen. Aufgrund der kegelförmigen Ausprägung des Plasmastrahls (siehe Abbildung 8) vergrößert sich die Einflusszone, was zusätzlich eine niedrigere Beschichtungsdicke zur Folge hat. Unter Bahnroutine wird die Abfolge von Relativbewegungen des Substrats zur Düse verstanden. Dieser Faktor hat einen Einfluss auf die Rauheit der erzeugten Strukturen. Beispielsweise kann eine vollflächige Beschichtung in parallel

zueinander angeordnete Bahnen unterteilt werden. Der Abstand dieser Bahnen zueinander wirkt sich aufgrund von Überlagerungseffekten auf die Schichtdicke und Rauheit aus. Zudem kann eine doppelte Prozessierung dergleichen Oberfläche bei rechtwinkliger Bahnverdrehung im zweiten Beschichtungsschritt die Rauheit ebenfalls beeinträchtigen. Eine Erhöhung der Anzahl an identischen Bahnabläufen trägt zu größeren Schichtdicken bei zunehmender thermischer Belastung des Substratmaterials bei. Somit wirken sich die unterschiedlichen Handhabungsparameter ebenfalls auf die Prozesstemperatur aus (siehe Abbildung 10).

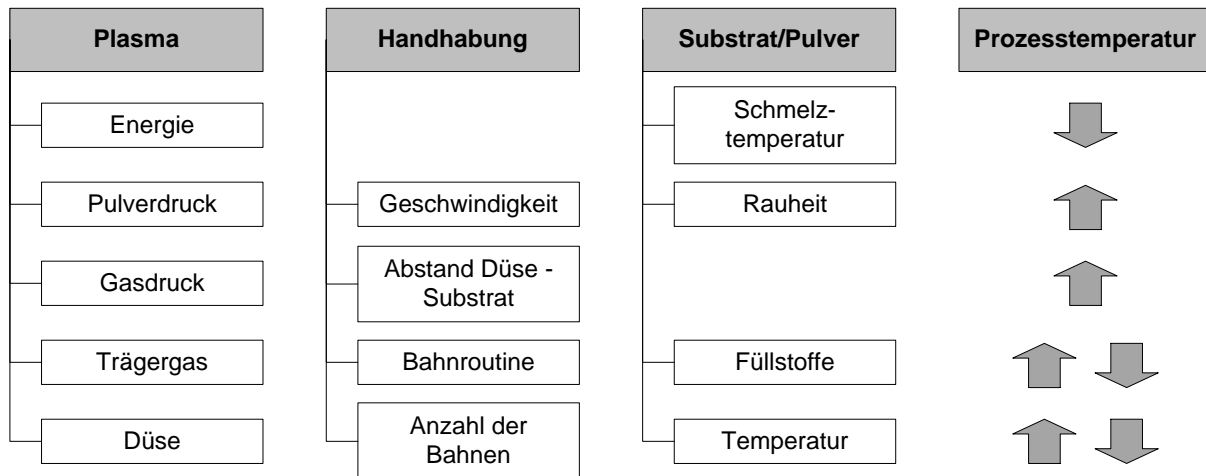


Abbildung 10: Einfluss der CAPM-Prozessparameter auf die Prozesstemperatur

Das Substratmaterial selbst bringt zahlreiche Einflussfaktoren in den Beschichtungsprozess mit ein. Abhängig von der Oberflächenrauheit ist eine qualitativ gute Haftzugfestigkeit mit mehr oder weniger großem Prozessoptimierungsaufwand verbunden. Gegebenenfalls ist eine Vorbehandlung der Oberfläche erforderlich. Ein ähnliches Verhalten ist bezogen auf die Materialzusammensetzung zu beobachten. Speziell bei Kunststoffen kann hierdurch der Beschichtungsprozess stark beeinflusst werden, wenn z. B. durch thermisch leitfähige Additive die Wärmeleitfähigkeit erhöht und somit das stationäre Aufheizen reduziert wird. Die Temperatur des Substrats vor Beginn der Beschichtung kann großen Einfluss auf thermisch induzierte Spannungen haben. Dies kann bei einem zu großen Temperaturunterschied zwischen Substratoberfläche und Plasmastrahl zu einer Delamination der Beschichtung führen. Die Schmelztemperatur bzw. Glasübergangstemperatur eines Materials beschreibt die maximal erträgliche Temperatur bevor molekulare Veränderungen auftreten, die meist ein sofortiges oder zukünftiges Versagen zur Folge haben. Somit sollte die Beschichtungstemperatur stets unterhalb dieser Grenztemperaturen liegen, was bei temperatursensiblen Materialien hohe Prozessgeschwindigkeiten, große Abstände oder eine aktive Kühlung erfordert. Abbildung 10 verdeutlicht zusammenfassend den Einfluss der genannten Parameter auf die Prozesstemperatur.

Als letzter Einflussparameter sind die Eigenschaften des verwendeten Metallpulvers zu nennen. Hierbei wirken sich vor allem Korngröße und Kornform auf die Rieselfähigkeit und Agglomeration des Pulvers aus. Die Korngröße sollte maximal 20 µm

betragen und eine sphärische Struktur aufweisen, um im Dispergierer gut dosierbar zu sein. Zu große Partikel oder Pulverflakes können ein Verklumpen der Kupferpartikel begünstigen. Als Folge sind eine ungleichmäßige Pulversättigung des Trärgases oder sogar ein Verstopfen der Plasmadüse möglich, was im Umkehrschluss zu einer Erhöhung der thermischen Belastung der Substratoberfläche führt. Die Reinheit des Kupferpulvers ist entscheidend für die Qualität der Schicht und deren mechanische Belastbarkeit. Eine Kontamination mit anderen Metallen kann z. B. die Duktilität, Leitfähigkeit oder Härte der Schicht beeinflussen. Idealerweise werden Kupferpulver mit einer Reinheit von mindestens 99,99% verwendet. Die maximal erreichbare Schmelztemperatur innerhalb der Plasmadüse stellt eine klare Limitierung des CAPM-Verfahrens dar. Ein Anschmelzen hochschmelzender Metalle (Mo, W) oder Keramiken ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , AlN) ist aufgrund der begrenzten Energie nicht möglich, was eine Verarbeitung dieser Materialien ausschließt. Eine klare Zuordnung bezüglich der Prozesstemperatur, ähnlich den vorangegangenen Einflussfaktoren, ist bei der Betrachtung des Metallpulvers nicht möglich.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Variation der Eingangsgrößen meist einen Einfluss auf die Prozesstemperatur bewirkt, was folglich Auswirkungen auf die Eigenschaften (Haftung, Dicke, Porosität) der generierten Metallschicht hat. In Anlehnung an eine klassische 5-M-Methode (Milieu, Mensch, Methode, Maschine, Material) sind die Kategorien Milieu und Mensch nicht Teil der Betrachtungen. Die Prozessumgebung ist im Hinblick auf eine wissenschaftliche Untersuchung von Atmosphärenplasma stets Normaldruck. Des Weiteren ist die Erzeugung einer Inertgasatmosphäre bei normalen Druckverhältnissen aufgrund anlagentechnischer Limitierungen nicht möglich (siehe Kapitel 3). Ein durchgehend automatisierter Prozessablauf macht den direkten Einfluss der Größe Mensch auf das Ergebnis verschwindend gering.

Der Einflussfaktor Plasma stellt die Kenngröße Methode, die Handhabung des Substrates die Maschine und das verwendete Substrat und Pulver das Material dar. Im nächsten Schritt wurden die in Abbildung 9 angeführten Einflussgrößen in Abhängigkeit der verfügbaren Anlagentechnik reduziert. Wie bereits mehrmals angeführt, ist die Kombination der Prozessparameter entscheidend für das Ergebnis der erzeugten Schicht. In Verbindung mit wechselnden Anforderungen an eine Kupferbeschichtung, welche sich durch den jeweiligen Einsatzbereich definieren, sind im Folgenden die wichtigsten Zielgrößen für die Untersuchungen dieser Arbeit genannt:

- Haftzugfestigkeit
- Schichtdicke
- Porosität
- Stromtragfähigkeit

Die gelisteten Kenngrößen werden ausführlich in Kapitel 4 betrachtet. Hierbei wird eine Unterscheidung abhängig des verwendeten Substratmaterials und der hiermit einhergehenden spezifischen Eigenschaften vorgenommen.

## 2.4 Einsatzmöglichkeiten der CAPM-Technologie

Die bisherigen Ausführungen zeigen deutlich die Potentiale der Plasmabeschichtung und im Speziellen der CAPM-Technologie auf. Insbesondere die hohe Flexibilität bei der Wahl des Grundmaterials kombiniert mit variablen Schichtdicken machen das Verfahren für verschiedene Anwendungsgebiete interessant. Im Folgenden werden die MID-Technik und die Leistungselektronik exemplarisch als mögliche Anwendungsgebiete näher beleuchtet.

### 2.4.1 MID-Technologie

Molded Interconnect Devices, sogenannte spritzgegossene Schaltungsträger, verbinden die Vorteile des Spritzgießprozesses (Gestaltungsfreiheit, Dreidimensionalität, Materialvielfalt) mit einer strukturierten Metallisierung. MID-Bauteile stellen im klassischen Sinne eine Kombination aus mechanischen und elektrischen Funktionalitäten dar, vermehrt werden aber auch optische, fluidische oder thermische Merkmale integriert. Eine Ausweitung über den klassischen Kunststoffspritzguss hinaus hin zu alternativen Substratmaterialien, wie z. B. Keramiken, führt dazu, dass heute meist von Mechatronic Integrated Devices gesprochen wird. Aktuell ist eine Vielzahl an Herstellungsverfahren für die MID-Schaltungsträger auf dem Markt verfügbar (siehe Abbildung 11), die je spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Die LDS, das 2K, das Folienhinterspritzen und die Drucktechnologien stellen aktuell die bedeutendsten Verfahren dar. [4; 3; 7]

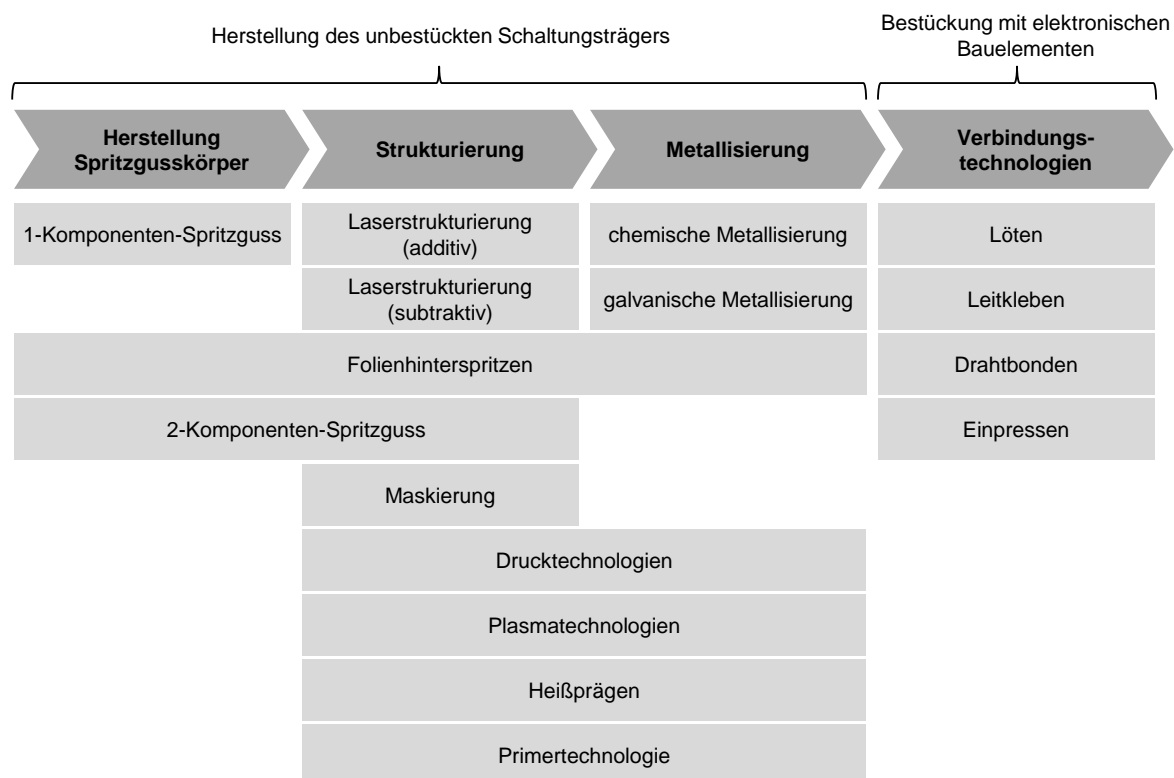


Abbildung 11: Referenzprozesse verschiedener MID-Herstellungsverfahren [3; 61; 62]



Anhand von Abbildung 11 ist der Prozessablauf eines MID-Schaltungsträgers, unabhängig vom gewählten Verfahren, zu erkennen. In den ersten drei Schritten werden der Spritzgusskörper hergestellt und die strukturierte Metallisierung aufgebracht, bevor abschließend elektronische Komponenten mit den verschiedenen Technologien der klassischen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) bestückt und elektrisch kontaktiert werden. Die Wahl des richtigen Herstellungsverfahrens ist von technologischen, ökonomischen und ökologischen Faktoren abhängig und setzt einen interdisziplinären Denkansatz voraus, um ein optimales Ergebnis zu erreichen. [62]

Das LPKF-LDS<sup>®</sup>-Verfahren stellt den aktuell wichtigsten Vertreter der MID-Herstellungsverfahren dar, was unter anderem auf die hohe Flexibilität, die Verwendung für Prototypen- als auch zur Serienfertigung, die geringen Werkzeugkosten, die Darstellung von Fine-Pitch-Strukturen und eine hohe 3D-Gestaltungsfreiheit zurückzuführen ist. Allerdings ist die LDS nur auf speziellen Kunststoffen oder Lacksystemen möglich, welche ein notwendiges Additiv enthalten. Der LDS-Lack wird bei Substratmaterialien verwendet, bei denen eine Zugabe des Additivs während der Herstellung nicht möglich ist (z. B. Metall oder Keramiken). Während der LDS erfolgen eine Ablation der Oberfläche (ca. 1 - 2  $\mu\text{m}$ ) und eine gleichzeitige Aktivierung der Keime des beigesetzten Additivs. In nachgelagerten chemisch außenstromlosen Metallisierungsbädern wird diese katalytisch aktive Strukturierung klassisch mit Kupfer, Nickel und einem Goldflash metallisiert. Schichtdicken liegen meist im Bereich von 5 - 10  $\mu\text{m}$  je Kupfer- und Nickelschicht und 0,1  $\mu\text{m}$  Gold. Mit Hilfe der Galvanik können auch dickere Kupferschichten erzeugt werden, was aber mit erhöhten Kosten und zusätzlichen Prozessschritten verbunden ist. [4; 63]

Neben dem LPKF-LDS<sup>®</sup>-Verfahren gewinnen zunehmend Drucktechnologien, allen voran das AJ-Verfahren, an Bedeutung, was in der einfachen Prozesskette aus Drucken und Aushärten der Tinte begründet liegt. Das AJ-Verfahren basiert auf der Zerstäubung einer Tinte (leitfähig, halbleitend, dielektrisch, isolierend) durch einen Trägergasstrom zu einem Aerosol. Vektorbasiert können somit kleinste Strukturen auf planare und dreidimensionale Substrate gedruckt werden. Nach der Aerosol-Erzeugung wird dieses über Schlauchsysteme zum Druckkopf gefördert. Gleichzeitig erfolgt eine Verdichtung und Absaugung zu kleiner Partikel. Mit Hilfe eines Schutzgases (z. B.  $\text{N}_2$ ) wird das Aerosol als fokussierter Strahl auf die Substratoberfläche aufgebracht. Hierbei ermöglicht die geringe Aerosoltropfengröße von 1 - 5  $\mu\text{m}$  die Darstellung feinsten Leiterbahnstrukturen (10 - 20  $\mu\text{m}$  Leiterbahnbreite). Nach dem Druck erfolgt beispielsweise ein thermisches Sintern im Ofen oder ein selektives Aushärten durch UV- oder Laserlicht. Aktuelle Anwendungen im Bereich der Sensor- oder Antennentechnik verwenden Silber-Nano-Tinten und weisen Schichtdicken von ca. 5  $\mu\text{m}$  im gesinterten Zustand auf. [4; 64]

MID-Applikationen erstrecken sich über ein breites Spektrum an Anwendungsgebieten. Die Automobilindustrie fordert aufgrund steigender Anzahl elektronischer

Systeme für Sicherheit, Kommunikation und Informationstechnik eine zunehmende Integration, um sowohl das Gewicht zu reduzieren als auch die Kosten zu senken. Die Vielfalt an MID-Herstellungsverfahren ermöglicht es, für jeden Einsatzbereich im Automobil die entsprechende Applikation zu generieren. Sogar in hochbeanspruchten (thermisch, chemisch) Umgebungen, wie dem Motorinnenraum, können MIDs eingesetzt werden. Der Vorteil der Miniaturisierung spielt vor allem bei Produkten der Medizintechnik eine entscheidende Rolle. Die Möglichkeiten heutiger Mikrochips machen, kombiniert mit der zunehmenden Notwendigkeit infolge des demografischen Wandels, hochintegrierte und leistungsstarke Medizinprodukte immer interessanter. So werden bereits Hörgeräte oder Einmalpräparate für die Bioanalytik durch die MID-Technologie realisiert. Sensoren und Beleuchtungsmodule zeigen den Hauptanwendungsbereich der Industrieautomatisierung auf. Eine beliebige räumliche Anordnung von LEDs oder Sensoren zur Überwachung von Fertigungsprozessen oder der zunehmende Einsatz von RFID-Antennen zur kontaktlosen Signalübertragung zeichnen die MID-Baugruppen in diesem Anwendungsgebiet aus. Den größten Anteil am globalen MID-Markt bilden allerdings seit Jahren die IT- und Telekommunikationssparte. Speziell die Herstellung von Antennen für Smartphones, Tablet-PCs und Laptops sorgt für jährliche Millionenstückzahlen. Hier wird vor allem die räumliche Gestaltungsfreiheit genutzt, um elektromagnetische Sende- und Empfangseigenschaften für die verschiedenen Funkstandards (WLAN, Bluetooth, UMTS, LTE) zu verbessern. [4; 62]

Aktuelle Entwicklungen beziehen sich auf die Qualifizierung neuer Substratmaterialien für das LPKF-LDS®-Verfahren, die Charakterisierung verschiedener Tinte-Substrat-Kombinationen für das AJ-Verfahren und die allgemeine Steigerung und Kontrolle von Qualität und Zuverlässigkeit. Unberührt davon sind neue Anwendungsgebiete fernab der Sensor- und Signalstromübertragung, was vor allem in der Limitierung der wirtschaftlich generierbaren Schichtdicken begründet liegt. Zusätzlich sind teilweise aufwändige Modifizierungen von alternativen Substratmaterialien (Aktivieren für Drucktechnologien, Compoundieren mit Additiven für LDS) oder unter Umständen nur strukturierbare LDS-Lackierungen möglich, um das Portfolio an Materialien zur erweitern.

Die CAPM-Technologie bietet sich in diesem Zusammenhang als eine sinnvolle Erweiterung der MID-Herstellungsverfahren an, infolge derer Applikationen mit der Möglichkeit einer erhöhten Stromtragfähigkeit versehen werden können. Zudem ist eine Verwendung alternativer Substratmaterialien wie beispielsweise Keramiken möglich, um die höheren thermischen Belastungen infolge der höheren Ströme effizient abzuleiten. Neben den technologischen Vorteilen können wirtschaftliche Vorteile durch eine Vermeidung der chemischen Metallisierung, eine deutliche Reduzierung der Prozesskette und eine Erweiterung des Materialportfolios erzielt werden.

### 2.4.2 Leistungselektronik

Die Lebensdauer von Leistungselektronik-Baugruppen ist beschränkt. In den unterschiedlichen Betriebszuständen treten sehr hohe Temperaturdifferenzen auf, die bedingt durch die unterschiedlichen eingesetzten Materialien zu erheblichen thermomechanischen Spannungen innerhalb der Baugruppe und letztendlich zu deren Ausfall führen. Um die Lebensdauer der Baugruppen zu erhöhen, sowie das technologische Potential heutiger Leistungsbaulemente vollständig auszuschöpfen, wird der Systemaufbau durch den Einsatz neuer Materialien und Technologien kontinuierlich weiterentwickelt. Eine Schwachstelle ist die oberseitige Anbindung der Bauelemente. Stand der Technik ist hier der Einsatz von Aluminium, das sowohl als Oberseiten-Metallisierung der Bauelemente als auch als Drahtbond-Material verwendet wird. Hier gehen die Bestrebungen dahin, Al-Draht durch Cu-Draht zu ersetzen, welcher Vorteile sowohl bezüglich thermischer und elektrischer Leitfähigkeit aufweist, als auch mechanisch günstigere Materialeigenschaften darstellt. Aufgrund der höheren Härte von Kupfer ist eine Cu-Drahtbondung auf der bisherigen Al-Metallisierung der Bauelemente jedoch nicht möglich, so dass eine zusätzliche Cu-Metallisierung aufgebracht werden muss. [65; 66] Dieser Prozess muss neben wirtschaftlichen auch technologische und verfahrenstechnische Anforderungen erfüllen:

- Cu-Schichten müssen strukturiert aufgebracht werden
- elektrische Leitfähigkeit soll möglichst der von Bulk-Cu entsprechen
- Haftung zur Al-Bauelement-Metallisierung muss hinreichend hoch sein
- Langzeitstabilität der genannten Kriterien muss gewährleistet sein

Die herkömmliche Waferprozessierung beinhaltet nasschemische galvanische Prozesse zur Abscheidung kupfermetallischer Deckschichten. Diese Technologie stellt die Basis für bisher im Forschungsmaßstab vorhandene oberseitig verkupferte Leistungshalbleiter dar. Nach dem Sputtern eines Seed-Layers sowie eines Fotolithografie-Schrittes wird in einem Galvanikprozess die Kupferschicht in der benötigten Stärke abgeschieden. Anschließend werden durch Strippen des Fotoresists und durch Differenzätzen die Zielstrukturen erreicht. Zuletzt werden die Leistungsbaulemente vereinzelt und von der Trägerfolie gelöst. Zusammenfassend werden hierbei technologisch aufwändige sowie zeit- und kostenintensive Prozesse miteinander verbunden. Zudem existieren verschiedene Beschichtungsverfahren, um elektrisch leitfähige Schichten auf Keramikoberflächen abzuscheiden. Für eine Realisierung großer Schichtdicken (100 - 600 µm) werden primär das Active Metal Brazing (Aktivlöten, AMB) oder das Direct-Copper-Bonded-Verfahren (DCB) verwendet. Dünne Schichten werden vor allem durch die Dickschicht- und Dünnschichttechnologie sowie durch das Chemical Vapor Deposition- (CVD) oder das Physical Vapor Deposition- (PVD) Verfahren aufgebracht.

Gängige gelötete Keramiken basieren auf einer Grundschicht aus Mo oder W, die mittels Siebdruck aufgebracht und eingebrannt werden. Zur Verbesserung der Lötbarkeit wird anschließend galvanisch oder chemisch eine Nickelschicht aufgetragen

sowie diese zum Korrosionsschutz bzw. zur Bondbarkeit zum Teil vergoldet. Dieses Metallisierungsverfahren ist jedoch sehr aufwendig und lässt sich signifikant durch Verwendung von Aktivloten vereinfachen. Beim sogenannten AMB werden in einem Ofendurchlauf Metallfolien, wie beispielsweise Kupfer, direkt mit der Keramik verbunden (siehe Abbildung 12).

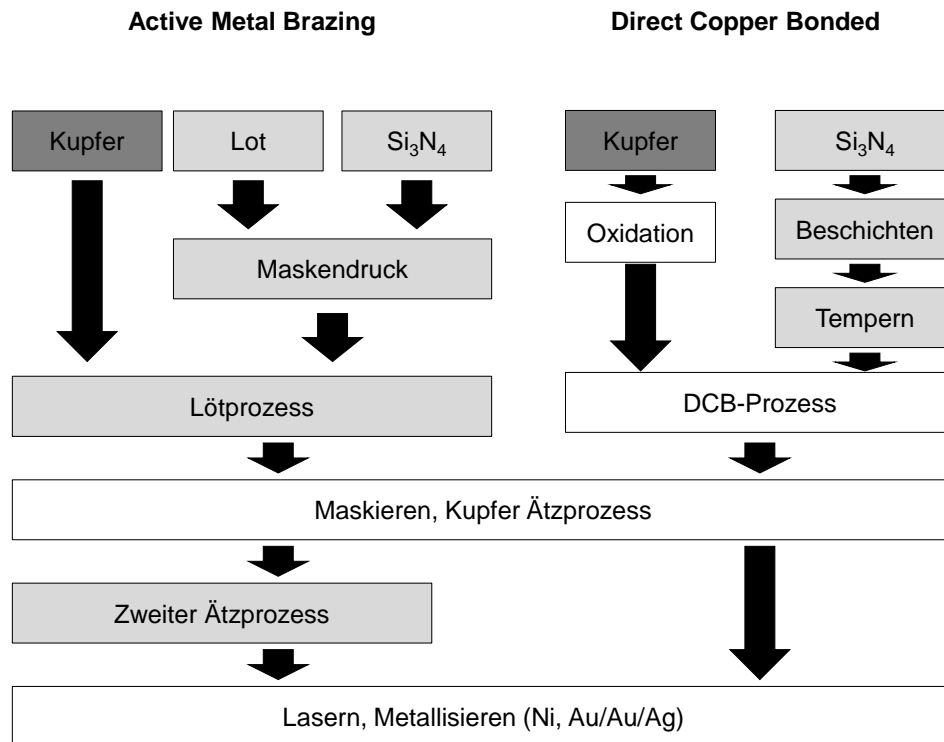


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Prozessketten der Verfahren AMB (links) und DCB (rechts) [67]

Um dies zu erreichen werden dem Lot aktive Bestandteile wie Zirkonium, Hafnium oder Titan zugegeben, die in der Lage sind die Grenzflächenenergie soweit herabzusetzen, dass eine Benetzung erfolgen kann. Das aktive Element reagiert mit der Keramikoberfläche zu einem Mischkristall, während das Lot-Eutektikum das Kupfer bindet. Als Standard-Lot werden hierfür Ag-Cu-Legierungen mit zehn Masse-Prozent Titanhydrid als Aktivkomponente verwendet. Die Löttemperatur im Schutzgas- oder Vakuumofen beträgt ca. 950 °C. Die erreichbaren Schichtdicken betragen zwischen 100 µm und 600 µm. Abbildung 12 verdeutlicht die Prozesskette des Aktivlötens auf Siliciumnitrid-Keramik. Der erste Prozessschritt ist das Aufbringen von Lot durch Siebdruck und das Kaschieren mit Kupferfolien. Anschließend werden beide Komponenten zusammen gelötet und das überschüssige Material durch Maskieren und Ätzen entfernt. Im letzten Schritt können weitere funktionale Schichten aufgetragen werden. [62; 68; 69]

Beim DCB, auch eutektisches Kupferbonden genannt, werden Kupferfolien unter hohen Temperaturen und einer proaktiven Gasatmosphäre direkt mit dem Keramiksubstrat verschmolzen. Hierbei wird zunächst das Kupfer unterhalb des

Schmelzpunktes in einer reaktiven Atmosphäre, bestehend aus  $N_2$  und geringen Mengen an Sauerstoff (50 - 200 ppm) oxidiert. Bei einer Temperatur von 1080 °C wird die Keramik von der eutektischen Schmelze benetzt. Bei einer Verwendung von  $Al_2O_3$  reagiert das Kupferoxid mit diesem in der Grenzfläche zu einem Kupfer-Aluminiumspinell, der für eine gute Benetzung sowie hohe Haftfestigkeit sorgt. Analog lässt sich der DCB-Prozess für weitere oxidische Keramiken anwenden. Bei nichtoxid-Keramiken wie AlN erfolgt zunächst die Umwandlung der Oberfläche in Aluminiumoxid < 10 µm. Anschließend wird die Kupferfolie ebenso wie bei Oxid-Keramiken aufgelötet. In abschließenden Prozessschritten können Leiterstrukturen maskiert und geätzt werden. Dieses Verfahren ermöglicht Kupferschichten bis zu 600 µm. [69; 70; 71; 72]

Die genannten Verfahren bilden die Basis für die AVT aktueller Leistungsmodule. Aufgrund des breiten Einsatzgebietes und der steigenden Nachfrage zeigt der Markt für Komponenten elektronischer Leistungssteuerung seit Jahren ein starkes Wachstum von etwa 10% pro Jahr. Die aktuellen energiepolitischen Diskussionen lassen eine weiter kontinuierlich steigende Nachfrage nach einem effizienten Umgang bei der Erzeugung und Wandlung elektrischer Energie erwarten. Insbesondere die Fachgebiete Energietechnik, Antriebstechnik, Mikrosystemtechnik, Medizintechnik, Informations- und Kommunikationstechnik sowie Automatisierungstechnik werden dadurch adressiert. [73; 74; 75]

Die CAPM-Technologie stellt aufgrund ihrer hohen Flexibilität, kurzer Taktzeiten, sowie niedriger Prozesstemperaturen eine sinnvolle Ergänzung für die Herstellung von Leistungsmodulen dar. Vor allem die hohen Temperaturen, kostenintensiven und aufwändigen Prozessabläufe aktueller Verfahren verbunden mit den zunehmend kürzer werdenden Produktlebenszyklen tragen zu einem gesteigerten Interesse an einem schnellen variablen und kostengünstigen Verfahren bei.

### **2.4.3. Handlungsbedarf für den Einsatz der CAPM-Technologie**

Anhand von Abbildung 13 werden die Potentiale der CAPM-Technologie, sowohl für den Einsatz in der MID-Technik, als auch in der Leistungselektronik, zusammenfassend nochmals dargestellt. Ein Vergleich der ausgewählten MID- und Leistungselektronik-Verfahren mit der CAPM-Technologie zeigt, dass die kaltaktive Plasmatechnik aufgrund ihrer Prozesseigenschaften und der großen Materialauswahl eine sinnvolle Erweiterung der jeweiligen Einsatzgebiete darstellt. Somit kann die Limitierung herkömmlicher MID-Strukturierungs- und Metallisierungsverfahren, wie beispielsweise der LPKF-LDS®- und der Aerosol-Jet-Technologie, im Bereich Leistungsübertragung deutlich verbessert werden. Des Weiteren können durch den einfachen und schnellen Prozessablauf, insbesondere komplexe chemische oder galvanische Metallisierungsprozesse (erforderlich bei LDS) bzw. zeitintensive Ofenprozesse (erforderlich bei AJ-Verfahren), vermieden werden, wodurch die Herstellungszeiten deutlich reduziert werden können. Verbunden mit der Möglichkeit großflächige

Substratkörper kostengünstig zu beschichten stellt im Vergleich zum Stand der Technik nicht nur eine umfassende Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten, sondern auch ein enormes wirtschaftliches Potential dar.

	Flexibilität	Werkzeugkosten	3D-Gestaltungsfreiheit	Fine-Pitch	Materialauswahl	Leistungsübertragung	Prozesszeit	Prozesskosten
LPKF-LDS®	++	+	++	+	o	-	o	o
Aerosol-Jet	++	+	+	++	+	--	-	-
AMB	o	o	--	+	-	++	-	-
DCB	-	-	--	+	-	++	-	-
CAPM	++	+	+	--	++	+	+	+

*Abbildung 13: Verfahrensvergleich anhand ausgewählter Prozesseigenschaften*

Der größte Nachteil der Metallisierungsverfahren AMB und DCB liegt in den komplexen und mehrstufigen Verfahrensabläufen, welche nicht nur auf planare Strukturen limitiert sind, sondern auch hohe thermische und chemische Belastungen an die Substratmaterialien aufweisen. Mit der CAPM-Technologie können Prozessschritte und -kosten eingespart, die Materialauswahl aufgrund der geringeren Belastungen während der Beschichtung erweitert und neue Möglichkeiten infolge der 3D-Gestaltungsfreiheit realisiert werden.

Ein Einsatz der CAPM-Technologie im Umfeld der MID-Technik oder der Leistungselektronik erfordert eine umfassende Untersuchung der verschiedenen Prozessparameter und deren Wechselwirkungen, um eine dem jeweiligen Anwendungsfall entsprechende optimale Parameterkombination, welche die Realisierung der erforderlichen Schichteigenschaften erlaubt, zu definieren. Hierbei sind die vier bereits genannten Eigenschaften Haftzugfestigkeit, Schichtdicke, Porosität und Stromtragfähigkeit entscheidend für eine optimale Beschichtung. Neben diesen quantifizierbaren Größen werden auch qualitative Merkmale überprüft. Hierbei werden auf die Kantenschärfe der generierten Strukturen, eine mögliche Rissbildung in der Metallisierung, eine gleichmäßige geometrische Strukturbreite und die Oxidation der Leiterstruktur optisch bewertet.

### **Bestimmung der Haftzugfestigkeit**

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stellen stets die Basis für weitere Parameteroptimierungen dar, da beispielsweise eine Schichtdickenmaximierung oder eine Porositätsminimierung nur mit ausreichender Haftzugfestigkeit der Beschichtung technisch und wirtschaftlich sinnvoll sind. Die Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen der generierten Kupferstruktur und der Substratoberfläche erfolgt mit Hilfe des Stirnabzugtests nach DIN EN 582. [76] Hierfür werden die Proben vor der Metallisierung mit einer entsprechenden Edelstahlschablone versehen, um die notwendigen kreisförmigen Strukturen realisieren zu können (siehe Abbildung 14).

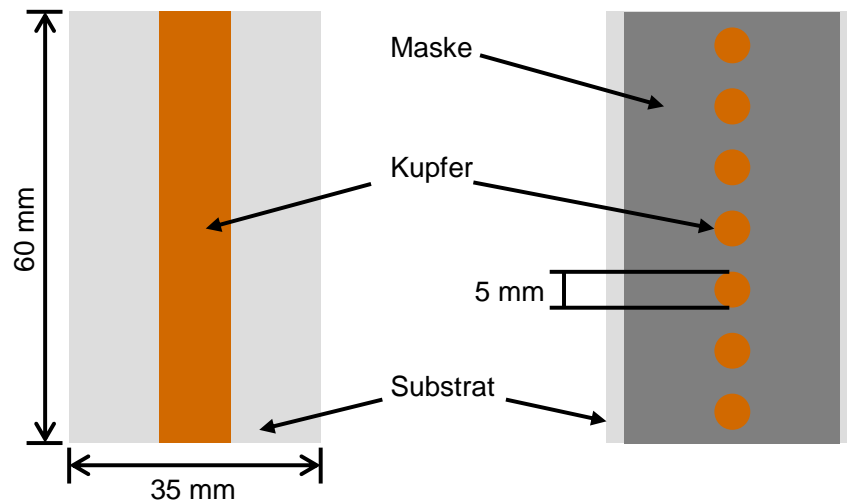


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines beschichteten Substratkörpers (links) und einer maskierten Beschichtung (rechts)

Nach der Metallisierung wird beim Test die generierte Schicht senkrecht zur Oberfläche abgezogen bzw. abgerissen. Für den Versuchsaufbau werden rundstabförmige Prüfstempel (1) (siehe Abbildung 15) mit einem Durchmesser von 5 mm mit Hilfe eines Zweikomponentenklebers (UHU Plus Endfest 300) auf die Substratoberfläche (2) geklebt. Die Stempel werden während des Klebprozesses in einem Zylinder geführt, um ein senkrecht Positionieren zu ermöglichen und ein Verutschen zu verhindern. Anschließend erfolgt ein Aushärten im Ofen bei 100 °C für eine Dauer von 30 Minuten. Nach dem Abkühlen wird der Stabilisierungszylinder abgenommen und der Prüfling in eine Universalprüfmaschine (ZWICK Z010/TND) dem Stirnzugtest unterzogen. Der Stempel wird mit einer Fixierschraube in einer Aufnahme (3) eingespannt während die Substratplatte über einen Gegenhalter (4) auf dem Maschinentisch (5) fixiert wird. Nach dem Einspannen erfolgt eine senkrechte Zugbelastung bis der Stempel zusammen mit der Kupferschicht von der Substratoberfläche abgelöst wird. Hierbei zeichnet eine entsprechende Software (testXpert®) die Messwerte der 500 N Kraftmessdose (6) auf.

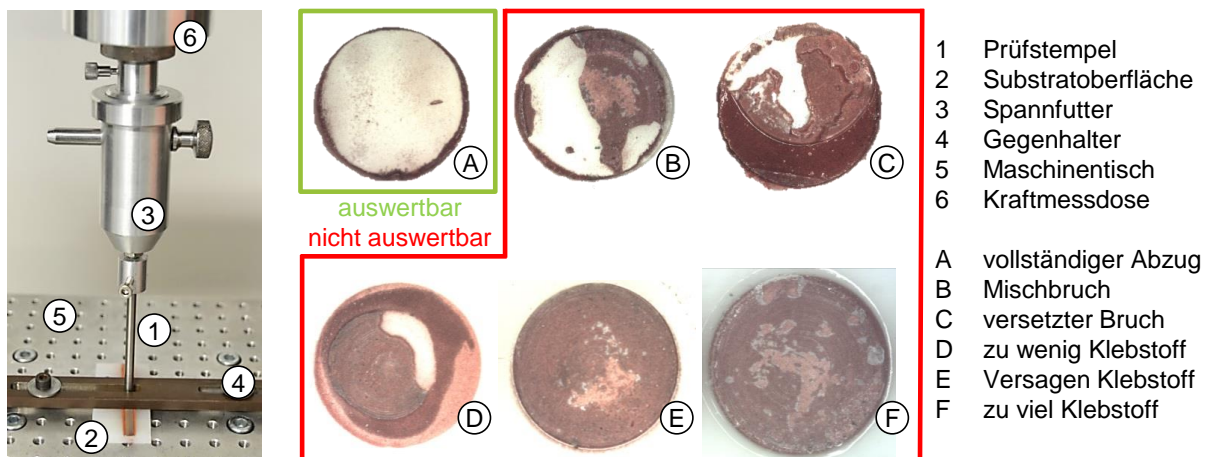


Abbildung 15: Messaufbau und Darstellung verschiedener Bruchbilder

Eine automatische Auswertung wird über die Fläche des Stempels vorgenommen und die Zugkraft in  $\text{N/mm}^2$  berechnet. Es sind sechs verschiedene Bruchbilder zu beobachten, welche in nicht auswertbare und auswertbare Versuche unterteilt werden. Zu den nicht auswertbaren Messergebnissen zählen Mischbruch (B), versetzter Bruch (C), zu wenig Klebstoff (D), Versagen des Klebstoffes (E) und zu viel Klebstoff (F). Daher werden nur die vollständigen Abzüge (A) in die folgende Auswertung aufgenommen.

### Bestimmung der Schichtdicke

Zu Beginn der vorliegenden Untersuchungen wurden die Schichtdicken der generierten Muster mit einem Röntgenfluoreszenzmessgerät (FISCHERSCOPE® X-RAY System XUVM) vermessen (siehe Abbildung 16). Die punktuelle Messwerterstellung erschwert eine Gesamtaussage bezüglich der Schichtdickenverteilung über die komplette Breite der erzeugten Struktur. Diese kann nur mit mehreren Messpunkten in definiertem Abstand zueinander analysiert werden.

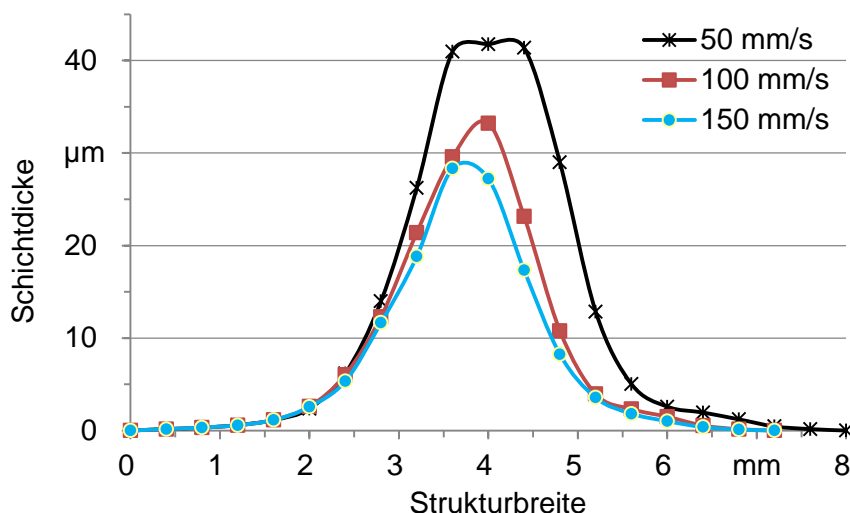


Abbildung 16: Exemplarische Messdatenauswertung mit dem Röntgenfluoreszenzmessgerät FISCHERSCOPE® X-RAY System XUVM

Abbildung 16 stellt beispielhaft gemessene Profile bei unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten dar. Der Abstand der einzelnen Messpunkte beträgt  $400\ \mu\text{m}$ . Es ist deutlich ein gaußähnlicher Verlauf der erzeugten Leiterbahnstrukturen zu erkennen. Zudem zeigen die Schichten einen sehr steilen Anstieg an den Flanken hin zum Maximum der Schicht, welches mit abnehmender Geschwindigkeit zunimmt. Ein Anstieg der Prozessgeschwindigkeit ist zudem mit einer Verschmälerung der Leiterbahnen verbunden. So zeigen Strukturen mit geringen Prozessgeschwindigkeiten im Vergleich zu hohen eine breitere Glockenausprägung. Diese aufwändige Messmethode verbunden mit einer Limitierung des Messgerätes auf eine Schichtdicke von  $50\ \mu\text{m}$  führt dazu, dass in den nachfolgenden Untersuchungen die Schichtdickenmessungen stets mit der 3D-Laserscan-Farbmikroskopie von Schliffbildern durchgeführt werden.



Das verwendete Laserscanmikroskop (KEYENCE VK-9700) zählt zu den konfokalen Laser-Scanning Mikroskopen. Hierbei handelt es sich um ein spezielles Lichtmikroskop, das durch einen Laserstrahl erzeugte Fluoreszenzlichtstrahlung detektiert und durch Modulation des Fokuspunktes die Dreidimensionalität eines Objektes abbilden kann. Hierzu wird ein ultravioletter Diodenlaserstrahl auf das Messobjekt gerichtet und mit Hilfe einer entsprechenden Linsenkonstruktion fokussiert. Ein dreidimensionales Gesamtbild des Messobjekts entsteht durch Zusammensetzen der gerasterten Einzelbildpunkte und Ebenen durch eine entsprechende Software. [77]

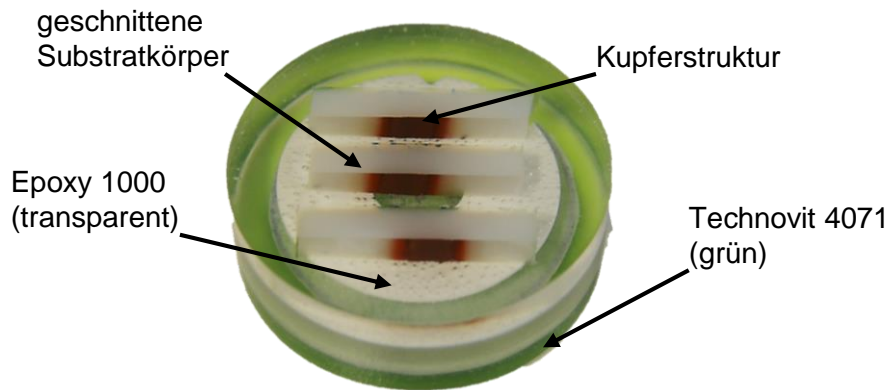


Abbildung 17: Präparierte Proben zur Schichtdickenmessung

Die Bestimmung der Schichtdicke erfolgt auf Basis eines Schliffbildes der Kupferstruktur. Hierfür wird die Probe mit einer Diamantsäge planar gesägt und anschließend hochkant mit einem Harzsystem vergossen (siehe Abbildung 17). Nach der Aushärtung des Harzes werden durch verschiedene Schleif- und Polierschritte die Analyseschichten präpariert und abschließend im Laserscanmikroskop vermessen.

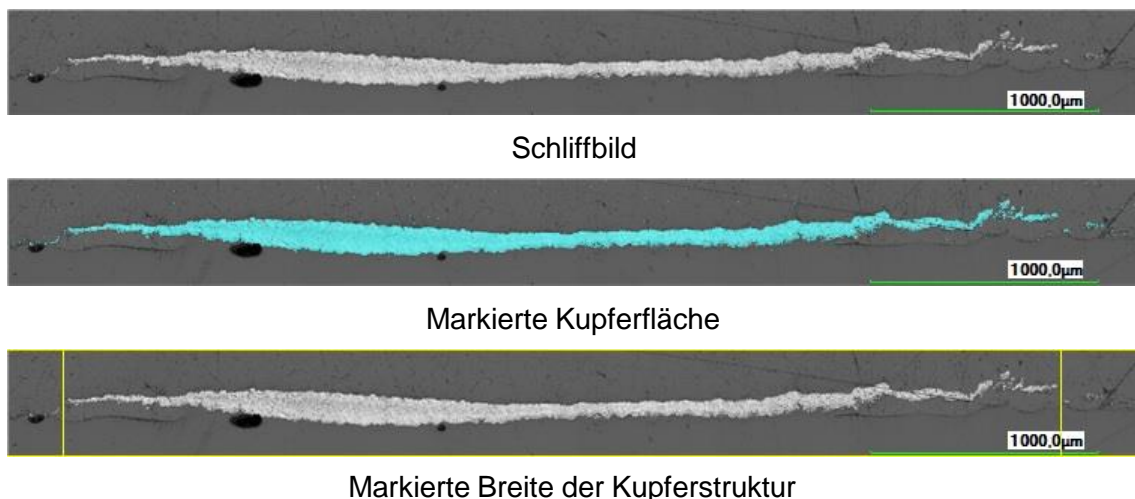


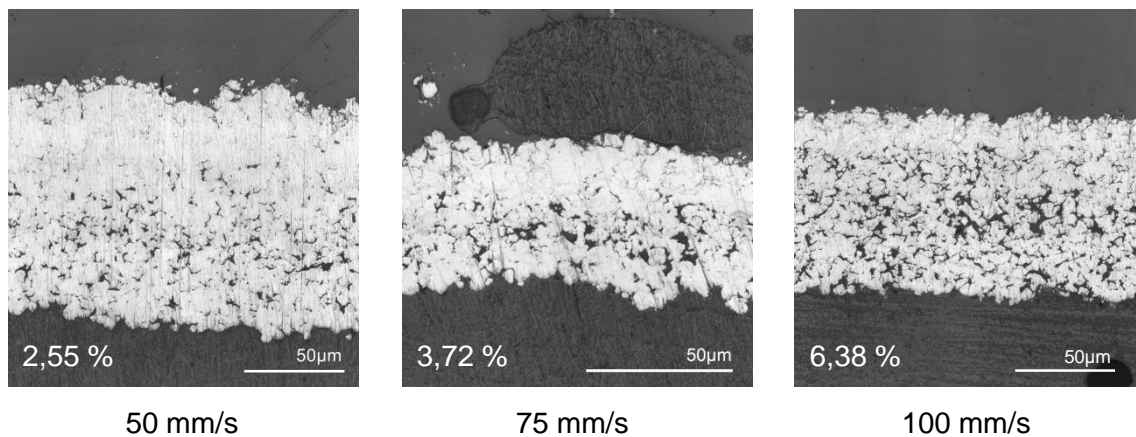
Abbildung 18: Bestimmung der Schichtdicke mit Hilfe eines Schliffbildes

Die präparierten Substrate werden mit einer 20-fachen Vergrößerung mikroskopiert, um die Kupferstruktur analysieren zu können (siehe Abbildung 18). Die Bestimmung der Schichtdicke erfolgt mit Hilfe der entsprechenden Software (VK-Analyser), wel-

che zunächst über den Schwellwert des Kontrasts im Laserintensitätsbild die gesamte Fläche der Schicht ermittelt. Um eine durchschnittliche Schichtdicke der Kupferschicht über die Probenbreite zu erhalten, wird die Kupferfläche durch die Breite der Leiterbahn dividiert. Als Ergebnis wird eine gemittelte Schichtdicke über die gesamte Breite der Schicht ausgegeben, welche nachfolgend für die Bestimmung der Stromtragfähigkeit von entscheidender Bedeutung ist.

### Bestimmung der Schichtporosität

Die Porosität der generierten Kupferschicht ist ein entscheidender Faktor im Hinblick auf die Haftzugfestigkeit und die Stromtragfähigkeit. Die Bestimmung erfolgt ebenfalls anhand der vorab angeführten Metallographie. Die erstellten Mikroskopaufnahmen werden mit einer entsprechenden Software (ImageJ) zum Detektieren der Fehlstellen ausgewertet. Abbildung 19 zeigt exemplarisch drei Schliffbilderausschnitte, die sich in der Prozessparameterkombination unterscheiden. Die entsprechende Porosität je Probekörper ist angegeben.



*Abbildung 19: Exemplarische Schliffbilderauszüge unterschiedlicher Schichtporosität in Abhängigkeit von der Prozessgeschwindigkeit*

Die Haftzugfestigkeit ist direkt mit der Porosität gekoppelt. Vor allem im Bereich der Grenzschicht Kupfer-Substratoberfläche ist davon auszugehen, dass poröse Schichten einen geringeren Messwert zur Folge haben. Eine dichte Kupferstruktur an der Grenzfläche bedingt eine höhere Haftzugfestigkeit infolge der Verklammerung der einzelnen Partikel mit der Oberfläche und untereinander. Lunker stellen in diesem Bereich Schwachstellen dar und reduzieren die Haftzugfestigkeit.

Da sich die Stromtragfähigkeit über den spezifischen Widerstand der Kupferstruktur berechnet, ist bei einer höheren Porosität bei konstanter Schichtdicke von einer geringeren Leitfähigkeit auszugehen.

### Bestimmung der Stromtragfähigkeit

In vielen Bereichen der Elektrotechnik müssen Leiterplatten hohe Ströme tragen. Die daraus resultierende Erwärmung darf einen festgelegten Wert nicht überschreiten. Der maximale Dauerstrom in Ampere, der von einer Leiterbahn der Breite  $b$  und der

Höhe  $h$  transportiert werden kann, ohne dabei eine zuvor definierte Grenztemperatur zu überschreiten, wird Stromtragfähigkeit genannt. Generell ist anzumerken, dass die Begriffe Stromtragfähigkeit und Strombelastbarkeit analog verwendet werden können. Abbildung 20 zeigt das zugrunde liegende Prinzip.

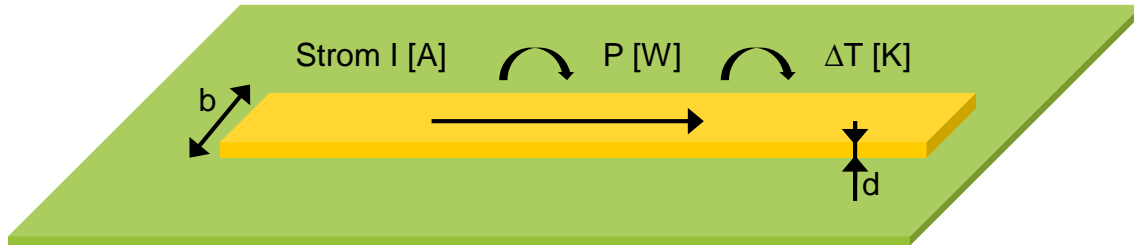


Abbildung 20: Prinzip der Stromtragfähigkeit [78]

Nach dem Jouleschen Gesetz

$$P = U \cdot I \text{ bzw. } P = R I^2 \quad (4.1)$$

ist die Wärmeleistung  $P$  [W] eines stromdurchflossenen Leiters direkt proportional vom absoluten Widerstand  $R$  [ $\Omega$ ] und quadratisch von der Stromstärke  $I$  [A] abhängig. Berücksichtigt man zusätzlich,

$$R(T) = \frac{L \rho(T)}{A} \quad (4.2)$$

$$\rho(T) = \rho_{T_0} (1 + \alpha_{T_0} (T - T_0)) \quad (4.3)$$

dass der Widerstand steigt je

- höher die Temperatur,
- länger der Leiter und
- kleiner die Leiterquerschnittsfläche ist,

lässt sich der folgende Zusammenhang für die Stromtragfähigkeit  $I$  ableiten. Aus den Gleichungen (4.2) und (4.3) folgt bei Umgebungstemperatur  $T_0$ :

$$I(T) = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{P \frac{bd}{L \rho_{T_0} (1 + \alpha_{T_0} (T - T_0))}} \quad (4.4)$$

$R(T)$ : temperaturabhängiger Widerstand in  $\Omega$

$L$ : Länge des Leiters in m

$\rho(T)$ : spezifischer temperaturabhängiger Widerstand in  $(\Omega \cdot \text{mm}^2)/\text{m}$

$A$ : Leiterquerschnittsfläche in  $\text{mm}^2$

$\rho_{T_0}$ : spezifischer Widerstand bei  $T_0$

$\alpha_{T_0}$ : Temperaturkoeffizient bei  $T_0$

$b$ : Leiterbreite in mm

$d$ : Leiterhöhe in mm

Aus Gleichung (4.4) ist zu erkennen, dass die Stromtragfähigkeit wächst, je höher und breiter die Leiterbahn ausgelegt wird. Berücksichtigt man die kühlende Leiterplattenfläche kürzt sich  $L$  heraus, da die kühlende Fläche der Leiterplatte in gleichem Maße wächst. Eine Problematik bei der Auslegung von Leiterbahnen liegt nicht an den Berechnungen infolge der Gleichung (4.4), sondern darin, die mehrdimensionale Wärmeleistung  $P$ , die durch die Stromheizung der Leiterbahn entsteht, ausreichend genau zu bestimmen. So spielen hier die Faktoren der Wärmespreizung der Leiterplatte als Kühlkörper und die Abgabe der Wärme an die Umgebung eine wichtige Rolle. [78; 79]

Für eine Bestimmung der Stromtragfähigkeit können mehrere Modelle herangezogen werden. Die IPC-2221 [80] ist ein empirisch entwickeltes Diagramm, aus dem, unter Vorgabe der Leiterbahngeometrie, direkt die zugehörige Strombelastbarkeit der Bahn ausgelesen werden kann. Dem Diagramm der IPC-2221 liegt folgende Formel zugrunde: [81]

$$I_{IPC}[A] = 9,6 \cdot A[mm^2]^{0,68} \Delta T[K]^{0,43} \quad (4.5)$$

Numerische Simulationsrechnungen nach [82; 83] haben gezeigt, dass die Designrichtlinie IPC-2221 nur anwendbar ist, wenn folgende vier Bedingungen gelten:

- die Leiterbahn ist geradlinig
- die Schichtdicke des Kupfers beträgt 35  $\mu m$
- es gibt eine 35  $\mu m$  starke Kupferschicht auf der Rückseite
- die Leiterplatte ist aus 1,6 mm dickem FR4 und unterliegt natürlicher Konvektion in freier Abstrahlung.

Sobald von den genannten Bedingungen abgewichen wird, sind die Ergebnisse aus der IPC-2221 nicht mehr aussagekräftig, weshalb die Richtlinie in diesem Zusammenhang nicht herangezogen werden kann. Die IPC-2152 [84] ist zweiteilig aufgebaut und ersetzt teilweise die IPC-2221 durch generelle Dimensionierungsgrundlagen im ersten Teil und konkrete Anwendung im zweiten. Die Dimensionierungsgrundlagen basieren im Unterschied zur IPC-2221 nicht mehr auf Berechnungsformeln und resultieren in einem universellen Diagramm mit Kurvenscharen für Ströme bis 30 A. Folgende Punkte werden in der neuen Richtlinie berücksichtigt, um der universellen Einsetzbarkeit einer Kurve gerecht zu werden:

- Basisgeometrie des Leiters
- Verhältnis der Breite zur Höhe des Leiters
- Geometrisches Umfeld des den Strom tragenden Leiters
- Wärmespreizung

- Konvektion
- Umgebungstemperatur
- Stromprofil (Strom und Zeitintervall)

Allerdings sind die Kurven, wie in der IPC-2221, Spezialfälle die nur für eine bestimmte Basisgeometrie des Leitertyps zulässig sind und auf einer einlagigen Leiterplatte beruhen. Aufgrund des einlagigen Leiterplattenaufbaus sind nach Einhaltung dieser Richtlinie noch niedrigere Stromtragfähigkeiten zu erwarten als bei ihrem Vorgänger. [85]

Zusammenfassend kann die Behauptung aufgestellt werden, dass die Erstellung allgemeingültiger Aussagen, sowohl in der IPC-2221 als auch in der IPC-2152, an einer Umwandlung der komplexen geometrischen Randbedingungen in einfache Parameter scheitert. Eine simple Berechnung der Stromtragfähigkeit ist, im Hinblick der sehr stark von Leiterplattenlayout und -aufbau abhängigen Wärmeverteilung, nicht ableitbar. Aktuell liegen keine allgemeingültigen Formeln vor, die der Vielfalt und Individualität des Leiterplattendesigns gerecht werden. Zusätzlich ist die Art des Metallisierungsverfahrens in keiner der Szenarien berücksichtigt. Diese haben aufgrund von Gefügestruktur, Schichtdickenschwankungen und unterschiedlichen Rauheiten jedoch großen Einfluss auf die Leitfähigkeit und damit die Stromtragfähigkeit. Untersuchungen sollten direkt am konkreten Leiterbild durchgeführt werden und als Grundlage für empirisch fundierte Simulationstools dienen. Sogenannte Thermal Risk Management-Simulationen (TRM) berücksichtigen die Strahlung, Wärmeleitung und Konvektion zur detailgetreuen Berechnung der Temperatur bei der vorliegenden Baugruppe. Um schon bei der Entwicklung quantitative Aussagen über die Stromtragfähigkeit treffen zu können, sollte zum Zeitpunkt dieser Ausarbeitung auf derartige Simulationstools zurückgegriffen werden, da diese heutzutage nur  $\pm 10\%$  von den realen Bedingungen abweichen. [81; 83; 85] In Kapitel 5 wird ein Ansatz hierzu vorgestellt.

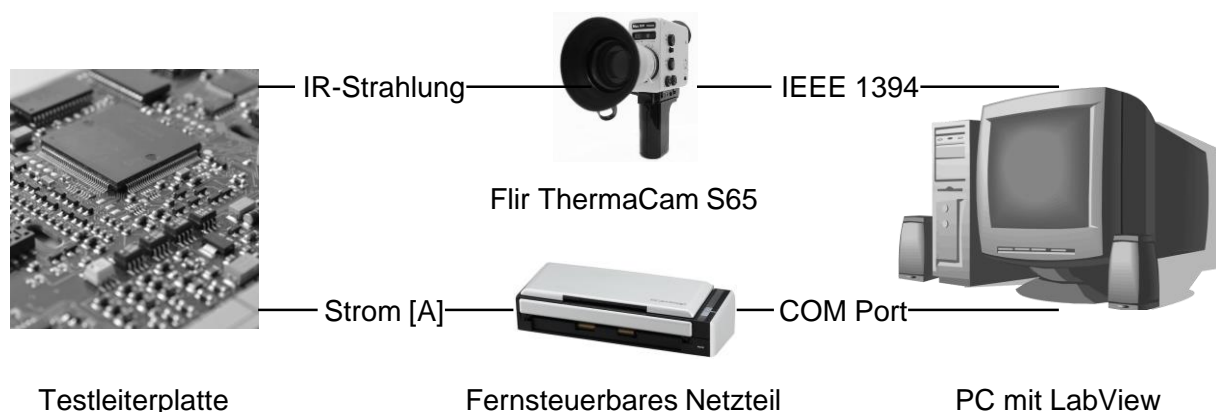
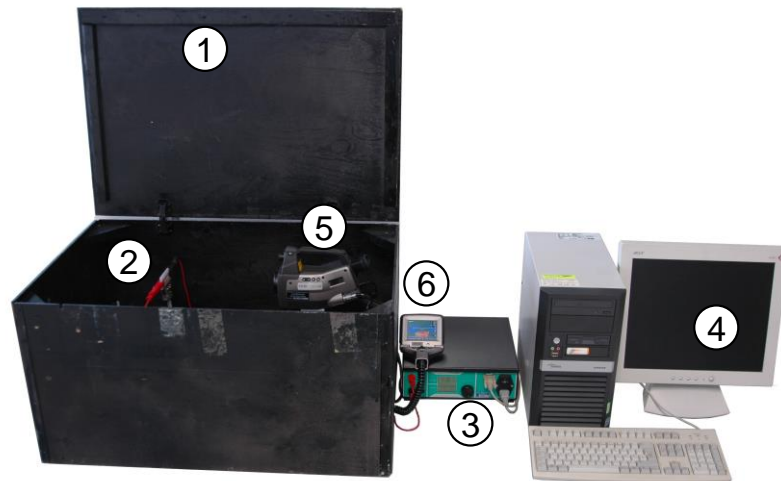


Abbildung 21: Schematischer Messaufbau der Stromtragfähigkeitsbestimmung

Abbildung 21 zeigt schematisch den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Stromtragfähigkeit. Die Messung der Stromtragfähigkeit erfolgt mit Hilfe einer thermogra-

phischen Messung mittels einer Wärmebildkamera. Diese berechnet aus der emittierten und reflektierten Infrarotstrahlung des Testobjekts dessen Temperatur. Das größte Problem eines solchen Messaufbaus ist der geringe Temperaturunterschied zur Umgebung. Bei einem  $\Delta T = 10\text{ °C}$  liegen viele Störquellen im gleichen Temperaturbereich, die das Ergebnis verfälschen können. Weiterhin können Luftbewegungen das Ergebnis um bis zu 30% beeinflussen.



*Abbildung 22: Messstand für die Bestimmung der Stromtragfähigkeit*

Um diese Störgrößen zu minimieren, wird das gesamte Stativ inklusive Kamera und Probe mit einer schwarzen Holzumhausung (1) nach Abbildung 22 umschlossen. Die Probe wird mit Krokodilklemmen (2) kontaktiert, um Strom bzw. Wärmeleistung in die Leiterbahn einzukoppeln. Angeordnet ist der genannte Aufbau gegenüber der Wärmebildkamera. Die Energieversorgung erfolgt über eine steuerbare 12 V Konstantspannungsquelle (3), welche über eine serielle Schnittstelle mit dem PC (4) verbunden ist. Die Wärmebildkamera (5) ist über FireWire ebenfalls mit dem Rechner verbunden. Um während der Messung in Echtzeit den Ablauf der Regelung mitverfolgen zu können, wird das abnehmbare Display (6) der Kamera aus der Einhausung herausgeführt.

### **Entwicklung und Umsetzung eines Anlagenkonzeptes**

Aus den vorangegangenen Ausführungen ist das Potential der CAPM-Technologie verbunden mit mehreren möglichen Anwendungsgebieten deutlich hervorgegangen. Neben den vielen Vorteilen der Technologie sind auch zahlreiche Einflussfaktoren (siehe Abbildung 9) auf den Prozess definiert worden. Eine Qualifizierung der CAPM-Technologie erfordert zuerst die Entwicklung eines entsprechenden Anlagenkonzeptes, um die Bearbeitung herkömmlicher Substratmaterialien entsprechend der genannten Einsatzgebiete zu ermöglichen. Die Forschungsarbeiten in Kapitel 3 beschäftigen sich mit der Konzeption und dem Aufbau einer CAPM-Prozesszelle. Hierbei werden sowohl unterschiedliche Integrationsmöglichkeiten der Plasmadüse (stationär, beweglich) diskutiert, als auch Betrachtungen für eine spätere Serienfertigung angestellt. Begleitend werden Sicherheits- und Prozessüberwachungsmaß-

nahmen für den Laborbetrieb installiert. Die Flexibilität des Anlagensystems bildet den zentralen Gesichtspunkt der Untersuchungen, um auf der einen Seite eine breite Variabilität in der Bearbeitung von planaren oder dreidimensionalen Substratkörpern unterschiedlicher Größendimensionen realisieren zu können. Auf der anderen Seite muss infolge von wechselnden Grundmaterialien mit je spezifischen Eigenschaften eine schnelle Programmierung der kompletten Anlagentechnik realisierbar sein. Hierfür werden unterschiedliche Handhabungssysteme und Programmierlösungen betrachtet.

### **Charakterisierung und Prozessoptimierung der CAPM**

Abhängig vom jeweiligen Einsatzgebiet zukünftiger Anwendungen und dem damit verbundenen Substratmaterial ergeben sich individuelle Prozessparameterkombinationen. In Kapitel 4 werden vier verschiedene Basismaterialien betrachtet, Thermoplaste und Duroplaste im Hinblick auf einen Einsatz in der MID-Technik und Keramiken und Halbleiter für Anwendungen in der Leistungselektronik. Die strukturierte Metallisierung steht dabei genauso im Fokus wie die vollflächige Kupferbeschichtung. Den Kern der Forschungsarbeiten bildet die Charakterisierung der erzeugten Schichten hinsichtlich mechanischer (Haftzugfestigkeit, Porosität), elektrischer (Stromtragfähigkeit) und geometrischer (Schichtdicke, -breite) Eigenschaften. Parallel hierzu werden die Einflüsse des Prozessgases ( $N_2$ , Formiergas) und einer Temperierung der Substratkörper untersucht. Somit werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Prozessparameter auf die Eigenschaften der Schicht für jedes der genannten Materialien evaluiert. Abschließend wird eine Übersicht des Einflusses der jeweiligen Prozessparameter auf die Schichteigenschaften erstellt, um zukünftig die Charakterisierung neuer Substratmaterialien zu beschleunigen.

### **Thermische Simulation des CAPM-Prozesses**

Neben den praktischen Untersuchungen in Kapitel 4 werden in Kapitel 5 die Möglichkeiten der thermischen Simulation bezogen auf den CAPM-Prozess betrachtet. Ziel ist es aufwendige Materialcharakterisierungen infolge zahlreicher praktischer Untersuchungen zukünftig durch entsprechende Simulationsmodelle zu substituieren, um Kosten und Anlagenbelegungen zu reduzieren. In einem ersten Schritt wird der thermische Einfluss auf das Substrat unter Verwendung von ANSYS nachgestellt. Mit Hilfe der spezifischen Materialkennwerte können die thermischen Belastungen während des Beschichtungsprozesses errechnet werden. Die Komplexität des Plasmaprozesses selbst, verbunden mit den Nichtlinearitäten im Zuge der Beschichtung macht eine vereinfachte Betrachtung notwendig. Kern der Forschungsarbeiten dieses Kapitels ist die Generierung eines ersten Simulationsmodells, welches schnell und einfach Änderungen an den Prozessparametern erlaubt. Des Weiteren werden die Simulationsergebnisse an realen Beschichtungsversuchen evaluiert, um Optimierungspotentiale für eine Anpassung an die vorliegende Prozessumgebung darzulegen, um somit die realen Abläufe möglichst detailliert nachzustellen. Zum Abschluss werden sinnvolle Weiterentwicklungen der generierten Datenbasis definiert.

## **Elektrische Kontaktierung der CAPM-Kupferstrukturen**

Die Erzeugung leitfähiger Strukturen stellt nur einen Schritt bei der Herstellung elektronischer Baugruppen dar. Für die Integration der CAPM-Technologie in herkömmliche Fertigungsprozesse sind eine elektrische Kontaktierung und eine Passivierung der Kupferstrukturen gegenüber Oxidation erforderlich. Klassische Verbindungstechniken der Elektronikproduktion, wie das Löten und das Leitleben, werden in Kapitel 6 untersucht. Hierfür werden CAPM-Kupferstrukturen mit herkömmlichen elektronischen Bauelementen versehen und anschließend getestet. Die Einflüsse des jeweiligen Verbindungsmediums auf die Schicht, als auch auf die erzielten Scherfestigkeiten der elektronischen Komponenten, werden in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter evaluiert. Die Forschungsarbeiten werden mit Hilfe von Schliffbildern in Kombination mit entsprechenden mikroskopischen Untersuchungen vertieft. In einem weiteren Schritt werden alternative Passivierungsmöglichkeiten der reinen Kupferstrukturen, wie das Lackieren oder die Zinnbeschichtung mittels CAPM, betrachtet. Den Abschluss bildet die CAPM-Zinnbeschichtung ausgewählter Kupferstrukturen, um die Potentiale und Anwendungsvielfalt der CAPM-Technologie nochmals zu unterstreichen.



### 3 Entwicklung und Umsetzung eines Anlagenkonzeptes

Für den Aufbau und die Umsetzung einer CAPM-Prozesszelle sind neben einer CAPM-Prozesseinheit, ein Handhabungssystem und eine gekapselte Bearbeitungszelle erforderlich. Die CAPM-Prozesseinheit setzt sich aus Steuerschrank, welche unter anderem die Hochleistungsstromquelle für die Zündung des Lichtbogens beinhaltet, und der Pulverprozesseinheit, in welcher die Pulverschaltventile für das Zuführen der Metallpartikel in den Trägergasstrom, die Dispergierer und ein Mass-Flow-Controller (MFC) für die Steuerung der Prozessgase untergebracht sind, zusammen. Die Wahl des Handhabungssystems ist unter anderem von der Positionierung der Plasmadüse und den Abmessungen der Substrate abhängig. Grundsätzlich können ein Knickarm-, ein Schwenkarm-, ein Portalroboter oder eine Parallelkinematik verwendet werden. Die Bearbeitungszelle sollte möglichst ein gekapseltes System darstellen, um die Umwelt vor den Prozessemissionen (Metallpulverstaub, Gase) zu schützen. Gleichzeitig muss eine ausreichende bauliche Größe vorhanden sein, um auch größere Grundkörper beschichten zu können. Im Folgenden wird näher auf die drei genannten Grundkomponenten eingegangen, anschließend werden verschiedene Konzepte vorgestellt und der entwickelte Aufbau präsentiert.



Abbildung 23: CAPM-Steuer- und Pulvereinheit PPE V1 [60; 86]

In Abbildung 23 ist die am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) zur Verfügung stehende CAPM-Prozesseinheit dargestellt. Sie setzt sich aus einem integriertem Simatic Control Panel (1), dem Steuerschrank mit dem Plasmaerzeuger plasmabrush PB3 (2), der Pulvereinheit (3) mit fünf Kartuschen für die Aufnahme der Metallpulver und der Dispergiereinheit (4) zusammen. Die Prozessparameter Plasma-/Trägergas, Gasdruck, Pulverdruck und Energie können über das Control Panel verändert werden. Die Hochleistungsstromquelle PB3 ist für die Erzeugung der gepulsten Bogenentladung an der Plasmadüse verantwortlich. Hierfür wird eine Frequenz von ca. 50 - 70 kHz für die Zündung des Lichtbogens bei einer

maximalen Leistung von 2 kW verwendet. Die gepulste Energiezufuhr ermöglicht es, die Ausbildung eines thermischen Gleichgewichts zwischen Elektronen und Ionen zu verhindern. Infolge dessen entstehen, basierend auf den hohen Zündfrequenzen, unterschiedliche Temperaturen der Elektronen und Ionen, was als nichtthermisches Plasma bezeichnet werden kann. [26; 87] Die Pulverzufuhr erfolgt über Metallkartuschen, welche manuell aus den vorliegenden Pulvergebinden befüllt werden müssen. Es stehen fünf Kartuschen in der Pulverbar (3) zur Verfügung, womit fünf verschiedene Metallpulver verwendet werden können. Jede Pulverkartusche ist an einen Dispergierer (4) gekoppelt. Dieser sorgt mittels Vibrationsschwingungen für das Aufbrechen von Pulveragglomeraten sowie für die kontinuierliche Förderung des Pulver-Tränergas-Gemisches zur Plasmadüse. Die Prozesseinheit PPE V1 stellt die erste Entwicklungsstufe der Anlagensysteme dar. Die neueren Modelle PPE V2 und PPE V3 verwenden eine alternative Pulverförderertechnologie. Hier wird direkt aus den entsprechenden Pulvergebinden mit Hilfe des verwendeten Trärgases oberflächennah gefördert. Über eine Pulvermembranpumpe wird der Gasfluss in das Pulver und zur Plasmadüse gesteuert. Großer Vorteil dieses Systems ist eine stabile Förderrate infolge der einfachen Zuführung des Pulvers durch Bereitstellung kompletter Gebinde und somit eine hervorragende Prozesskontrolle. Der Rest der Anlagentechnik ist baugleich zur PPE V1. [87]

Die dargestellte Prozesseinheit ist dem Lehrstuhl FAPS durch die Firma Reinhausen Plasma GmbH zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt worden. Anlagentechnische Modifizierungen sind aufgrund vertraglicher Vereinbarungen nicht möglich bzw. gestattet. Folglich wurden alle Untersuchungen dieser Arbeit mit einem handelsüblichen System durchgeführt

### 3.1 Auswahl eines geeigneten Handhabungssystems

Wie bereits in Kapitel 2.3 angeführt, gibt es drei verschiedene Möglichkeiten, ein Handhabungssystem zu integrieren:

- Relativbewegung des Substrates bei stationärer Anordnung der Plasmadüse
- Relativbewegung der Plasmadüse bei stationärer Anordnung des Substrats
- synchrone Bewegung von Plasmadüse und Substrat

Die erste Variante bietet den Vorteil der freien Bewegung des Werkstücks im Raum, was eine dreidimensionale Bearbeitung erlaubt. Die Größe der Baugruppen ist nur durch die Tragfähigkeit des Handhabungssystems bzw. die Abmessungen der Bearbeitungszelle limitiert. Zusätzlich wird durch eine stationäre Anordnung der Plasmadüse eine Bewegung der Zuleitungen (Plasmagas, Pulver-Tränergas-Gemisch, Hochspannungsversorgung) vermieden. Nichtlinearitäten, die infolge von beliebiger Positionierung der Plasmadüse im Raum und der damit einhergehenden Beschleunigung bzw. Ausrichtung der Zuleitungen entstehen können, werden unterbunden. Als nachteilig sind die notwendigen Greifersysteme zu nennen, die abhängig von der geometrischen Auslegung der Substrate individuell konstruiert bzw. angepasst

werden müssen. Abhilfe kann hier durch ein modulares System, ähnlich einem Greiferbaukasten, geschaffen werden. Heutige automatische Werkzeugwechsler erlauben einen schnellen und einfachen Tausch des Greifers innerhalb weniger Sekunden. Verbunden mit einem Greiferbahnhof, welcher eine Auswahl an unterschiedlichen Greifersystemen (Vakuum, Klemmen) beinhaltet, können schnell und einfach Anpassungen, beispielsweise an die vorliegende Geometrie, vorgenommen werden.

Bei einer Relativbewegung der Plasmadüse gegenüber dem stationären Substrat ist eine sehr geringe träge Masse zu führen. Dies begünstigt eine sehr genaue Positionierung im Raum. Zusätzlich ist eine Auslegung des Handhabungssystems nur auf das Gewicht der Düse erforderlich, was eine wirtschaftliche und kompakte Lösung ermöglicht. Allerdings ist bei einer maskenlosen Beschichtung nur eine minimale Strukturbreite von 2 mm möglich, was für miniaturisierte Leiterbahnstrukturen, beispielsweise für Sensoranwendungen, eine Maskierung der Substratoberfläche notwendig macht. Infolge dessen ist eine genaue Positionierung der Plasmadüse gegenüber dem Substrat nicht erforderlich. Zusätzlich ist auch hier, ähnlich Variante eins, für wechselnde Baugruppengeometrien eine spezifische Aufnahme zur Verfügung zu stellen.

Die größte Flexibilität des Systems ist bei der drittgenannten Variante gegeben, da hier beide Komponenten bewegt werden können. Mit dieser Lösung geht die Notwendigkeit von zwei Handhabungssystemen einher, was im Vergleich zu den beiden vorherigen Konzepten eine deutliche Erhöhung der Anschaffungskosten bedeutet. Des Weiteren sind bei parallel agierenden Handhabungssystemen komplexe Bahnabläufe zu programmieren, wodurch einfache und schnelle Programmänderungen erschwert werden. Zusammenfassend ist die erste Variante in Bezug auf Flexibilität, Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit das Konzept mit dem größten Potential (siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Gegenüberstellung der drei verschiedenen Bewegungsvarianten*

Handhabungssystem	Flexibilität	Genauigkeit	Kosten
stationäre Düse	+	+	+
stationäres Substrat	o	+	+
Bewegung Substrat und Düse	++	o	--

Im nächsten Schritt wird auf Basis der gewählten Bewegungsvariante ein entsprechendes Handhabungssystem ausgewählt. Wie oben angedeutet, können drei verschiedene Robotersysteme integriert werden, die hinsichtlich ihrer Bewegungsabfolgen, Wege und Winkel frei programmiert werden können. Der Bewegungsraum eines Roboters wird dabei durch dessen kinematischen Aufbau festgelegt. Translatorische und rotatorische Achsen sind hierbei die Voraussetzung für eine Positions-

änderung des Tool Center Point (TCP). Bezüglich der Positionsänderung kann zwischen einer werkstück- und einer werkzeugführenden Bewegung unterschieden werden. Im vorliegenden Fall soll das Werkstück unter dem feststehenden Werkzeug im Raum bewegt werden. Der geringe Platzbedarf, eine hohe Beweglichkeit sowie der kinematische Aufbau zeichnen den Knickarmroboter aus. Für eine dreidimensionale Bewegung im Raum sind mindestens fünf, idealerweise sechs Freiheitsgrade notwendig. Infolge dessen ist die Verwendung eines Schwenkarmroboters, dem sogenannten SCARA-Roboter, nicht möglich, da dieser standardmäßig nur vier Bewegungsachsen besitzt. Ein Portalsystem ist ebenfalls nicht für die CAPM-Prozesszelle geeignet, da einerseits klassisch nur ein 3-Achs-Aufbau (XYZ) zur Verfügung steht und zusätzlich die Dimensionen des Portals infolge der gewünschten variierenden Substratabmessungen bei gleichbleibenden Genauigkeitsanforderungen zu hohen Kosten führen. Der Einsatz einer umgedreht montierten Parallelkinematik, eines sogenannten Hexapods, zeigt Vorteile in der hohen Beweglichkeit und Positioniergenauigkeit sowie der optimalen Nutzung der fünf Freiheitsgrade und den geringen Kosten. Die variierende Substratgröße erfordert allerdings eine umfassende Raumabdeckung der Bearbeitungszelle, was bei Verwendung eines Hexapods eine große Stellfläche bedingt. Gleiches gilt für unterschiedliche Baugruppengewichte. Zusätzlich ist aufgrund der komplexen Kinematik ein höherer Steuerungsaufwand erforderlich.

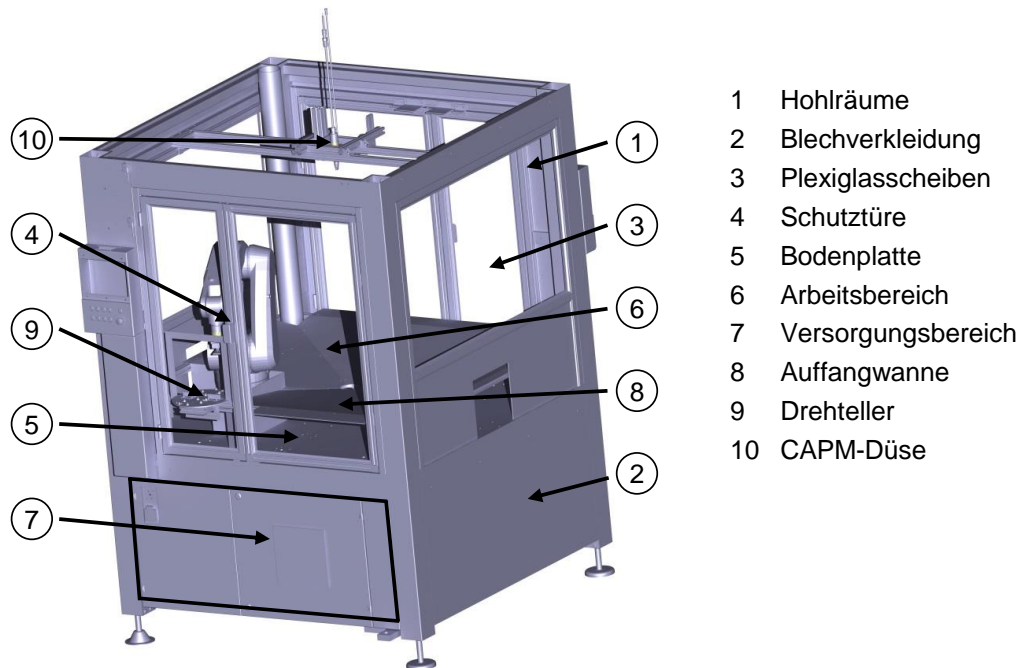
In den Untersuchungen dieser Arbeit wird ein Industrieroboter (KUKA KR 5 sixx R850) verwendet, welcher durch seine kompakte Bauweise und das geringe Eigengewicht für den Einsatz in einer Prozesszelle besonders geeignet erscheint. Industrieroboter geringer Baugröße werden aktuell in Bereichen eingesetzt, in denen Präzision und Schnelligkeit gefordert sind, wie beispielsweise beim Handling kleiner Bauteile bis zu einem Gewicht von 5 kg. Der verwendete Knickarmroboter weist einen nahezu kugelförmigen Arbeitsbereich auf. Die geringe Eigenmasse lässt diesen flexibel und mit einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,03$  mm agieren. Die verwendete Variante des besitzt eine maximale Reichweite von 855 mm bei einem Arbeitsraumvolumen von  $2,3 \text{ m}^3$ .

Die Montage verschiedener Greifersysteme kann der Roboter über drei in der Zentralhand integrierte Druckluftventile realisierten. Die Steuerung erfolgt über eine Control Panel (KCP), welches eine manuelle und programmierbare Bewegung ermöglicht. Zusammenfassend verfügt der verwendete Industrieroboter hinsichtlich Genauigkeit und Traglast über ausreichende Fähigkeiten für eine werkstückführende Substratbeschichtung mit dem CAPM-Verfahren.

### **3.2 Konzeption und Umsetzung der Prozesszelle**

Für die Integration der stationären Plasmadüse und des Industrieroboters wird eine herkömmliche Montagezelle (Typ Robox 3.3, Baumann Automation) verwendet. Diese bietet eine standardisierte Plattform für Roboterapplikationen und einen an den Industrieroboter angepassten Bearbeitungsraum. Aufgrund der verwendeten Mikro-

pulver während des Beschichtungsprozesses wird die Prozesszelle mit einem Schleusensystem zur Bauteilzufuhr, einem modularen Werkzeugwechselsystem sowie einer geeigneten Absaugung versehen, um gegebene Sicherheitsanforderungen im Umgang mit Mikropulvern gewährleisten zu können. Zusätzlich wurde ein berührungsloser laserbasierter Temperatursensor integriert, der die Beschichtungstemperaturen an der Substratoberfläche während des Prozesses detektiert.



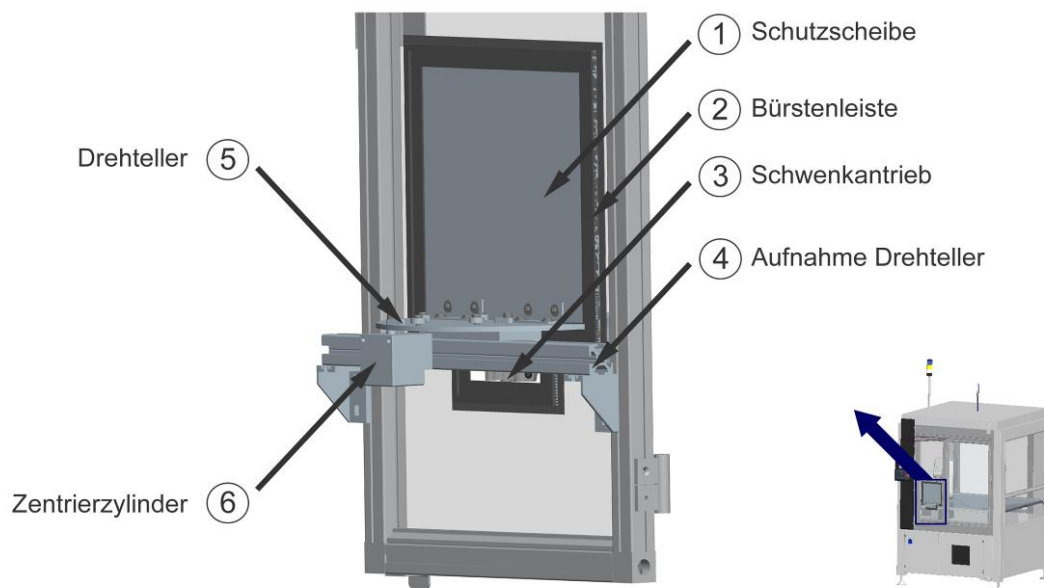
*Abbildung 24: Konzept der CAPM-Prozesszelle*

Die Hohlräume (1) des Grundgestells der Zelle werden als Kabelkanäle genutzt (siehe Abbildung 24) während eine Verkleidung durch Blechtafeln (2) die restliche Zelle umschließt. Im oberen Teil ist diese durch Plexiglasscheiben (3), die als Sichtfenster dienen, sowie auf zwei Seiten durch Schutztüren (4) ergänzt. Die Türen grenzen den Bearbeitungsraum gegenüber der Umgebung ab und gewährleisten Schutz vor den Prozessemissionen. Die Bauteilzufuhr wird über einen Drehteller (9) realisiert. Die Bodenplatte (5), auf der die Arbeitsgeräte verschraubt werden können, trennt den Arbeitsbereich (6) von dem darunter liegenden Versorgungsbereich (7) ab. Hier sind Versorgungs- und Steuerungskomponenten der Zelle untergebracht. In der Mitte des Arbeitsbereiches befindet sich eine Auffangwanne (8) für den Pulverstaub, welche direkt mit der Absaugung verbunden ist.

#### **Umsetzung eines Schleusensystems**

Um einen Atmosphären austausch zwischen Bearbeitungsraum und Umgebung zu verhindern, erfolgt die Konstruktion und Integration eines Schleusensystems mit automatisierter Bauteilzufuhr. Wie bereits mehrfach angeführt, ist der Prozesszelle aufgrund der verwendeten Metallpulver mit Korngrößen im Bereich von 100 nm - 20 µm gegenüber der Umwelt aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten abzugrenzen. Realisiert wird dies durch ein Schleusensystem in Form eines Drehtellers,

der in eine der beiden Türen integriert wird (siehe Abbildung 25). Die Drehtelleraufnahme (4) wird am Fensterrahmen verschraubt. Die Aufnahme wird mit einer Aluminiumplatte versehen, die sowohl als Versteifung der Drehtelleraufnahme, als auch als Adapterplatte für den Schwenkantrieb (3), dient. Die Aluminium-Drehtellerplatte (5) ist direkt mit dem Flansch des Schwenkantriebs gekoppelt. Im Hinblick auf variierende Substrate ist die Platte mit Bohrungen versehen, um weitere spezifische Aufnahmen mit dem Drehteller zu verbinden. Um eine Abdichtung der Spalten zwischen Schutzscheibe, Drehtelleraufnahme und Fensterscheibe gewährleisten zu können, werden Bürstenleisten (2) integriert. Die Zentrierung des Drehtellers wird über einen Zentrierzylinder (6) vorgenommen, der an das Strebenprofil montiert ist.



*Abbildung 25: Konzept des Schleusensystem in Form eines Drehtellers*

Bedingt durch die erforderliche Positioniergenauigkeit ist eine Zentrierung der Tür erforderlich. Der vorhandene Sicherheitsverschluss der Tür an der Oberseite wird durch eine Zentrierung mit einem Stopperzylinder an der Unterseite ergänzt. Die zentrale Steuerung erfolgt über die SPS der Prozesszelle. Der Drehprozess kann entweder durch den Roboter oder manuell am Bedienpanel der Prozesszelle ausgelöst werden. Bei Erreichen einer seiner zwei Endpositionen wird der Zentrierzylinder ausgefahren und die Drehtellerplatte ausgerichtet.

### **Integration eines automatisierten Werkzeugwechselsystems**

Für einen vollautomatisierten Bearbeitungsprozess, sowie das schnelle Umrüsten von Greifern, wird ein Werkzeugwechselsystem, der sogenannte Greiferbahnhof, in die Prozesszelle integriert (siehe Abbildung 26). Die Grundkomponenten setzen sich aus dem Werkzeugwechselsystem (5) und dem Werkzeugbahnhof (7) zusammen. Das Werkzeugwechselsystem selbst besteht aus einem Festteil, welches über einen Flansch (6) fest mit der Roboterhand verschraubt ist und einem Losteil, an welchem die Adapterplatte (4) und der Vakuumgreifer (3) montiert sind. Die Verriegelung zwischen Los- und Festteil wird mit einem doppelwirkenden Pneumatik-Zylinder mit



integrierter Druckfeder realisiert. Des Weiteren wird über die integrierte Luftdurchführung zwischen Fest- und Loseil eine schlauchlose Ansteuerung der Anbauteile ermöglicht. Somit können Anbauteile, wie beispielsweise ein Sauggreifer, angesteuert werden. Der Greiferbahnhof wird mit vier Slots ausgestattet, ist aber beliebig erweiterbar. Für den Schutz der Greifer vor den Prozessemissionen, wird dieser unterhalb der Auffangwanne mit dem umlaufenden Wannenrahmen verschraubt und mit einem Blech abgedeckt. Die Adapterplatten dienen als Halterung und können in den vorgesehenen Slots abgelegt werden. Abbildung 26 verdeutlicht die Notwendigkeit von verschiedenen Greifern.

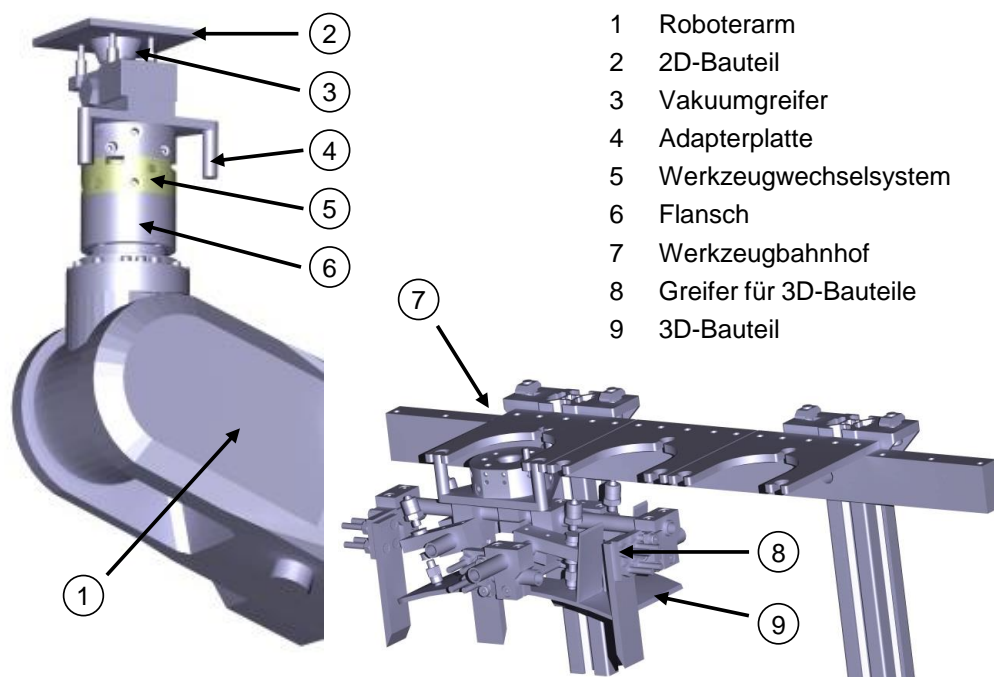


Abbildung 26: Konzept des Werkzeugwechselsystems

2D-Bauteile (2) werden durch einen Vakuumgreifer gehandhabt. Dieser besteht aus einem Saugnapf und vier Füßen, an deren Enden Kunststoffpuffer montiert sind. Sie ermöglichen ein oberflächenschonendes Arretieren der Bauteile. Für 3D-Bauteile (9) ist ein modularer Greifer (8) vorgesehen, der das Bauteil über variable Anschläge zentriert und zusätzlich über ein Saug-Handling-System fixiert.

Neben dem genannten Vakuumsauger wurde ein weiteres Greifersystem, ein Aluminiumheiztisch, in die Prozesszelle integriert. Vor allem für thermisch belastbare Substratmaterialien, wie beispielsweise Keramiken oder Halbleiter, ist eine Temperierung vor bzw. während des Beschichtungsprozesses in Bezug auf die Eigenschaften und die Qualität der generierten Kupferschicht hilfreich (siehe Kapitel 4.3). Der Heiztisch ist für die Aufnahme planarer Substrate mit den Abmessungen 70 mm x 70 mm geeignet. Die Fixierung erfolgt durch Aufspannen einer Hilfsplatte und Verschrauben dieser an den Rändern der Heizplatte (siehe Abbildung 27). Eine Temperierung ist stufenlos bis 300 °C regelbar. Die Aufnahme durch den Roboter erfolgt durch das gleiche Werkzeugwechselsystem wie die bereits genannten Greifersysteme, was ein schnelles und einfaches Rüsten erlaubt.

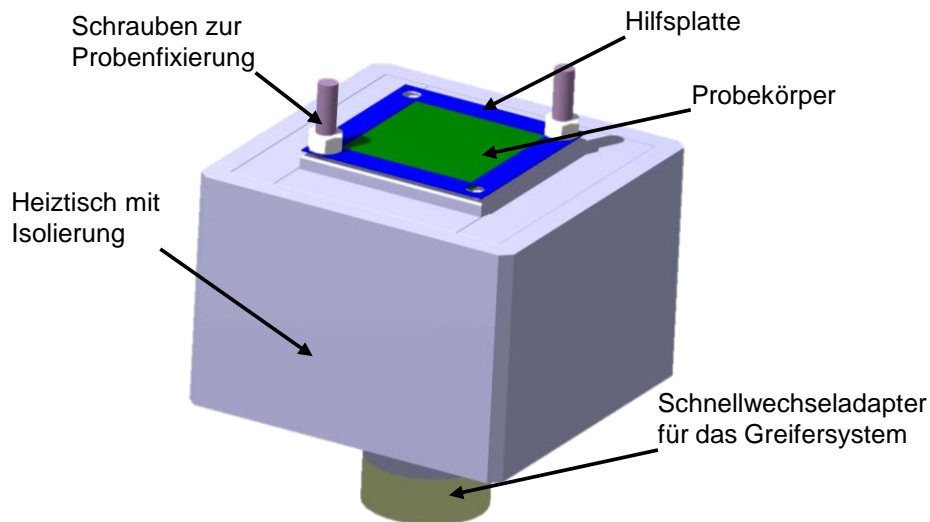


Abbildung 27: Konzept des Aluminium-Heiztisches

### Integration einer Absaugung

Für eine effiziente Absaugung der Prozessemissionen kommen mehrere Möglichkeiten in Frage. Eine Variante stellt die Realisierung eines laminaren Volumenstroms von der Decke zum Boden der Zelle dar. Durch eine flächige Frischluftzufuhr an der Zellendecke und eine Absaugung am Zellenboden werden die freien Metallpartikel durch die entstehende Strömung abtransportiert. Zusätzlich wirkt sich eine solche Anordnung nicht limitierend auf den Bewegungsraum des Roboters aus.

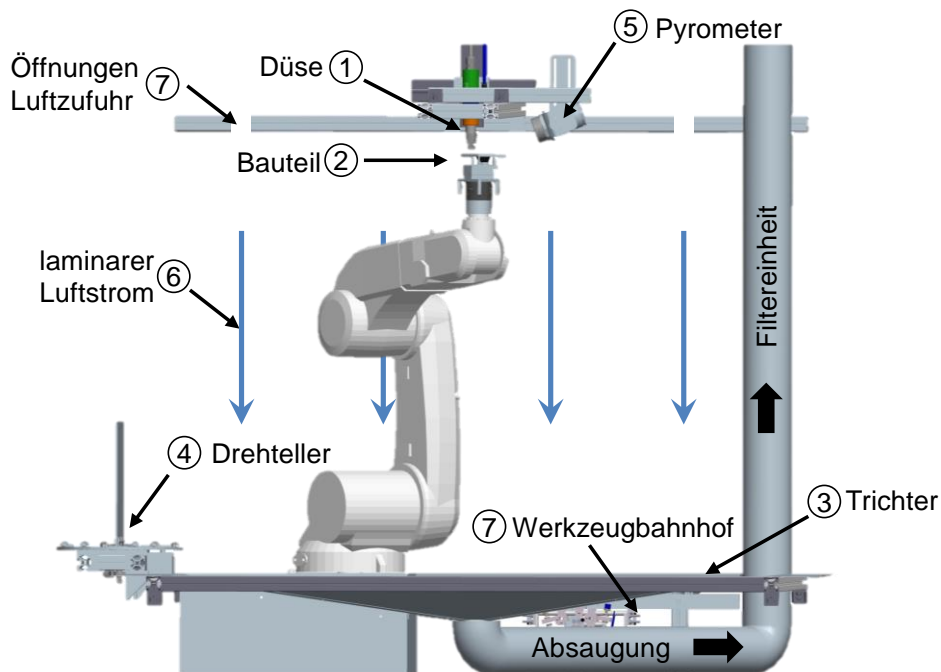


Abbildung 28: Konzept der Absaugung innerhalb der Prozesszelle

Eine Absaugung in unmittelbarer Umgebung der Prozesszone ermöglicht ebenfalls eine hervorragende Bindung der freien Partikel. Hierbei ist es notwendig, dass die Absaugung idealerweise direkt an der Plasmadüse montiert ist. Da eine Absaugung in Bodennähe unumgänglich erscheint, wird die erstgenannte Variante in die Pro-



zesszelle integriert (siehe Abbildung 28). Eine den kompletten Prozessraum abdeckende Wanne (3) fängt die Pulverpartikel auf und leitet sie in eine entsprechende Absaugung weiter. Notwendige Rohrleitungen verlaufen unterhalb der Wanne und führen in einer Ecke des Arbeitsraums nach draußen. Auf dem Dach der Zelle sind verschiedene Filtersysteme in Reihe geschaltet, um die feinstaubigen Metallpartikel aus der Abluft heraus zu filtern. Der Trichter wird durch einen umlaufenden Rahmen, der direkt an die Fensterrahmen verschraubt wird, aufgenommen. Somit ist eine dichte Verbindung zwischen Auffangwanne und Zellenboden gegeben. Die Wanne ist in fünf Stahlbleche unterteilt, von denen eines die Abdeckung für den Greiferbahnhof darstellt.

#### Auswahl und Integration eines Pyrometers

Die Wahl des richtigen Pyrometers ist vom Messabstand, dem Temperaturmessbereich, dem Spektralbereich sowie der Art des Sensors abhängig. Im vorliegenden Fall soll der Abstand zwischen Messpunkt und Pyrometer mindestens 100 mm betragen, um eine Einschränkung des Arbeitsraumes des Roboters zu vermeiden. Aufgrund der geringen Beschichtungstemperaturen der CAPM-Technologie ist der Messbereich zwischen 0 °C und 350 °C definiert, was mit einem niedrigen Spektralbereich von  $< 18 \mu\text{m}$  einhergeht. Bei der Nutzung eines analogen Sensors kann es aufgrund von Kabelbewegungen zu Messfehlern kommen, weshalb die Verwendung eines digitalen Systems bevorzugt wird.

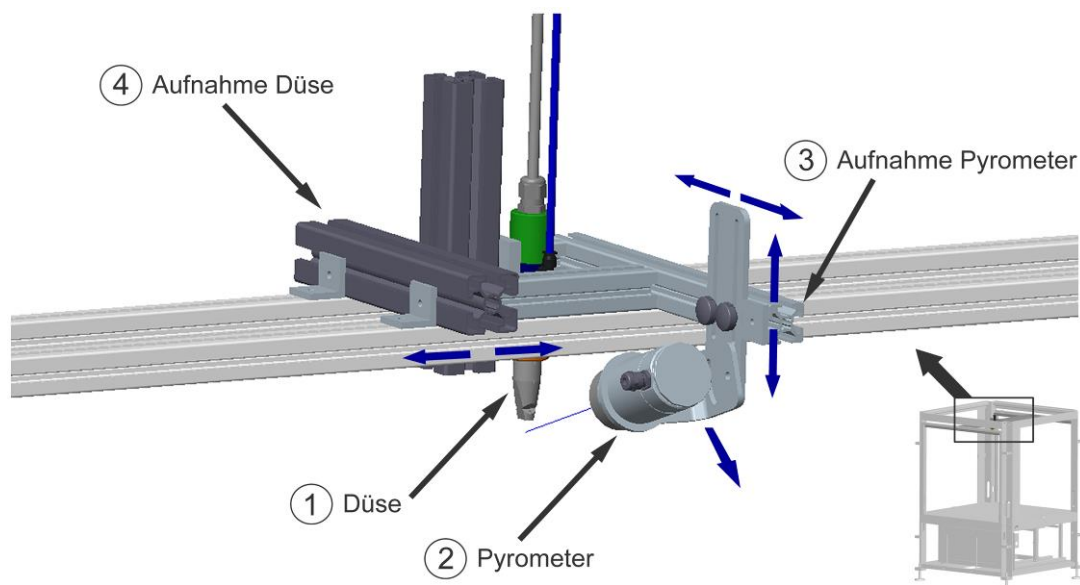


Abbildung 29: Konzept der Pyrometerintegration in der Nähe der Plasmadüse

Ein Vergleich aktueller am Markt verfügbarer Pyrometer führte zur Wahl des CTlaser P7 (Optris GmbH). Dieses besitzt neben einem zweiteiligen Sensor, bei dem die Auswerteeinheit außerhalb der Prozesszelle angeordnet werden kann, ein Doppel-Laservisier zur Markierung des Messfelds, was vor allem bei der Ausrichtung

auf variierende Substratkörper hilfreich ist. Zudem ist das Pyrometer mit einer digitalen Schnittstelle in Form eines USB Interface Kits ausgestattet. Die verbaute Optik hat eine optische Auflösung von 45:1. Der Messabstand liegt bei 135,5 mm. Die Einstellung des Abstandes erfolgt über eine entsprechende Aufnahme innerhalb der Prozesszelle. In ersten Überlegungen ist eine Montage des Pyrometers direkt an den Roboter betrachtet worden. Aufgrund des Gewichts von 600 g sowie einem Durchmesser von 55 mm bei einer Länge von 100 mm werden jedoch sowohl der Arbeitsraum als auch die Genauigkeit des Roboters beeinträchtigt. Zusätzlich wird die Bauteilaufnahme erschwert. Folglich wird das Pyrometer mit einer höhenverstellbaren Vorrichtung an der Düsenaufnahme befestigt (siehe Abbildung 29). Die parallel zur Düsenaufnahme (4) angeordneten Profile sorgen dafür, dass sich die Düsenmittellinie und die Pyrometermittellinie auf einer Ebene befinden. Bedingt durch die Variation des Bearbeitungsabstands zwischen Düse und Substratoberfläche muss die Messpunkthöhe schnell und einfach anpassbar sein, was durch ein stufenloses Arretieren von Rändelschrauben (3) ermöglicht wird. Ein weiterer Vorteil ist die Montage oberhalb der Düsenaufnahme, wodurch kaum eine Beeinträchtigung des Bewegungsraums des Roboters erfolgt.

### Aufbau einer Regeleinheit für Trägergase

Im Allgemeinen ist die Plasmabeschichtung mit verschiedenen Prozessgasen möglich (siehe Kapitel 2.2.1). In einigen Untersuchungen dieser Arbeit werden  $N_2$  und/oder Formiergas 95/5, bestehend aus 95%  $N_2$  und 5%  $H_2$ , als Plasma- bzw. Trägergase der CAPM-Prozesseinheit zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 4). In der Prozesseinheit werden die nötigen Mengen an Gas für die Plasmaerzeugung und den Pulvertransport durch den MFC geregelt und überwacht. Für die Zufuhr des Gases in den MFC steht aber nur eine Leitung zur Verfügung, was für den Betrieb mit einer Mischung aus beiden genannten Trägergasen eine separate Lösung erfordert. Hierfür werden zwei manuell regelbare Durchflussmesser (red-y compact regulator GCR, Vögtlin Instruments AG) [88] mit den jeweiligen Gasvorratsbehältern verbunden (siehe Abbildung 30).

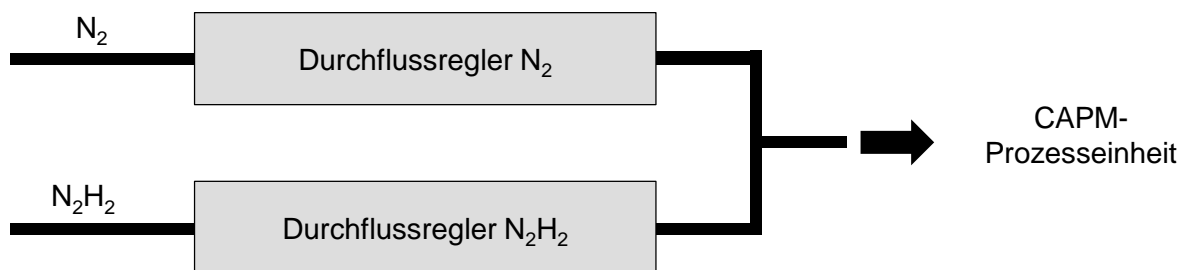


Abbildung 30: Regel- und Mischeinheit für die Trägergase

Die Regler erlauben eine druck- und temperaturunabhängige Dosierung und können sehr einfach per Drehknopf justiert werden, wodurch ein beliebiges Mischungsverhältnis realisiert werden kann.

#### Kommunikationshierarchie der CAPM-Prozesszelle

Die Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander benötigt eine entsprechende Informationshierarchie. Im vorliegenden Anlagensystem wird der Roboter als Master und alle weiteren Komponenten als Slave deklariert (siehe Abbildung 31), um den gesamten Fertigungsprozess auf Basis eines offline erstellten Roboterprogramms kontrollieren und steuern zu können. Über die digitalen Ein- und Ausgänge des Roboters wird die Kommunikation mit der CAPM-Prozesseinheit hergestellt, womit die Plasmaerzeugung und die Pulverzufuhr gestartet werden können. Hierfür ist in der werkseitigen Programmierung der CAPM-Prozesseinheit bereits Fernbetrieb vorinstalliert. Die Kommunikation zwischen SPS und Roboter erfolgt mit Hilfe eines universellen Logikmoduls (LOGO!, Siemens AG), welche meist zur Signalvorverarbeitung und zur dezentralen Vor-Ort-Steuerung von Maschinen und Prozessen eingesetzt werden. Die Programmierung basiert auf den allgemeingültigen Symbolen der Digitaltechnik. Die Eingänge sind potentialgebunden und besitzen somit gleiches Bezugspotential wie die Spannungsversorgung. Die Ausgänge hingegen sind Relais, deren Kontakte von der Spannungsversorgung und von den Eingängen potentialgetrennt sind. Dies ermöglicht den Anschluss verschiedener Lasten wie Magnetventile, Lampen und Motoren.

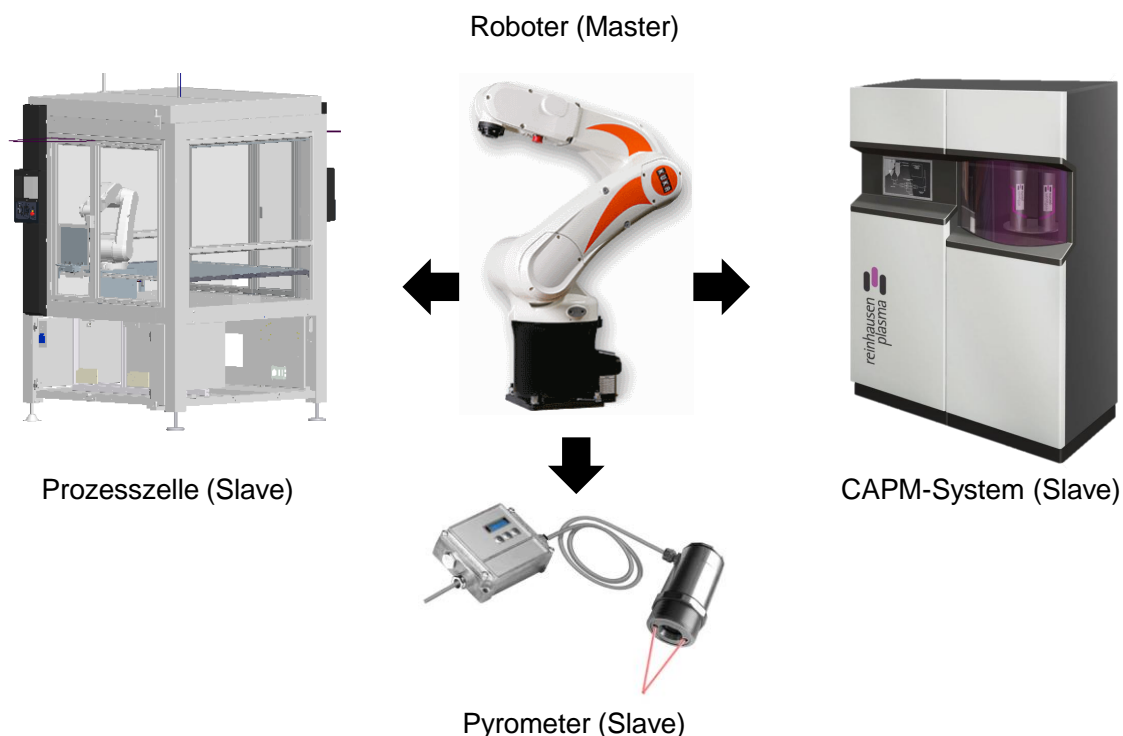


Abbildung 31: Kommunikationshierarchie der CAPM-Prozesseinheit [89; 90; 60]

Der Betrieb des Pyrometers erfordert sowohl eine Kommunikation zwischen Pyrometer und Roboter, als auch zwischen Pyrometer und Rechner. Nach dem Verbinden der Pyrometer-Auswerteeinheit mit einer USB-Schnittstelle wird die Versorgungsspannung sichergestellt und die Initialisierungsroutine des Sensors gestartet. Das Pyrometer bietet eine eigene Software, welche es erlaubt, zahlreiche Ein-

stellungen vorzunehmen. Eine automatisierte Messung mit mehreren aufeinander folgenden Einzelmessungen ist allerdings nicht möglich. Aufgrund der Notwendigkeit dieser Funktion wird ein eigenes Softwareprogramm entwickelt, dass zusätzlich noch folgende Funktionen beinhaltet:

- automatisches Starten, Beenden und Speichern einer Messung
- externe Steuerung durch eine SPS
- Software muss auf dem Steuerrechner im Hintergrund laufen können

Für die Umsetzung der genannten Funktionen sind sowohl eine Hardware- als auch eine Softwarekomponente erforderlich. Erstere stellt die Schnittstelle zwischen der SPS und dem PC her, um eine Auswertung der Pyrometerdaten zu ermöglichen und erhaltene Ergebnisse speichern zu können. Die Signalgebung zum Starten und Stoppen einer Messung erfolgt durch das Logikmodul. Die Schnittstelle zum Rechner wird über einen Mikrocontroller mit USB-Funktionalität realisiert. Dieser meldet sich als seriellles Gerät am Steuerrechner an und kann folglich sehr einfach über eine eigene Software gesteuert werden.

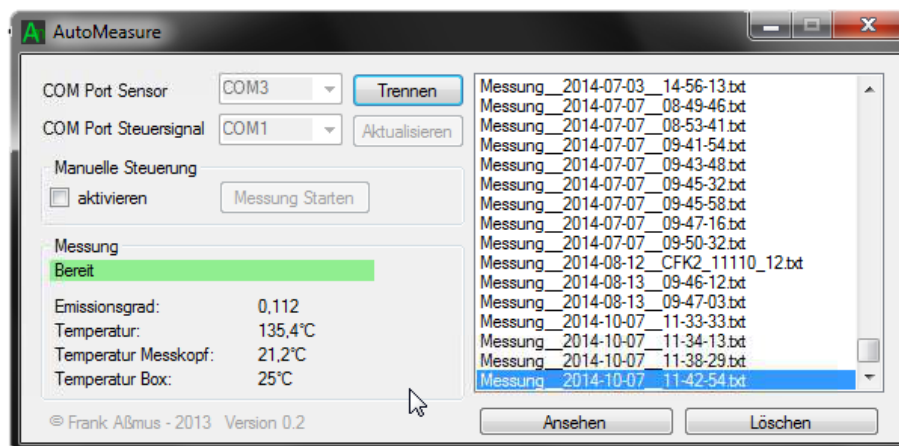


Abbildung 32: Benutzeroberfläche der Software AutoMeasure

Die programmierte Software (AutoMeasure) ist für die Steuerung des Pyrometers und die Abfrage der Signalschnittstelle verantwortlich. Spezifische Einstellungen des Pyrometers, wie beispielsweise der Emissionsgrad, können weiterhin direkt am Gerät oder über die offizielle Software vorgenommen werden. Nach dem Verbinden von AutoMeasure mit dem Pyrometer können automatische Messungen durchgeführt werden. Zusätzlich ist eine manuelle Messung möglich. Sobald der Sensor mit dem Rechner verbunden ist, werden im Bereich Messung der aktuell verwendete Emissionsgrad sowie die derzeitigen Temperaturen angezeigt (siehe Abbildung 32). Auf der rechten Seite werden alle gespeicherten Messungen aufgelistet und können direkt geöffnet oder gelöscht werden. Nach dem Öffnen erfolgt eine einfache Auswertung der Messdaten in Form eines Graphen. Nach dem Start einer Messung liest AutoMeasure die gemessene Temperatur mit 10 Hz aus und speichert diese kontinuierlich in einer Textdatei. Für eine problemlose Zuordnung werden Dateinamen, beste-

hend aus Datum und Uhrzeit, generiert. Zusätzlich werden zu Beginn jeder Messung die Startbedingungen erfasst und in der Textdatei archiviert. Darauf folgen alle gemessenen Werte jeweils mit Erfassungszeit, gemessen ab dem jeweiligen Startzeitpunkt.

#### **Umsetzung einer CAD-CAM-Kette**

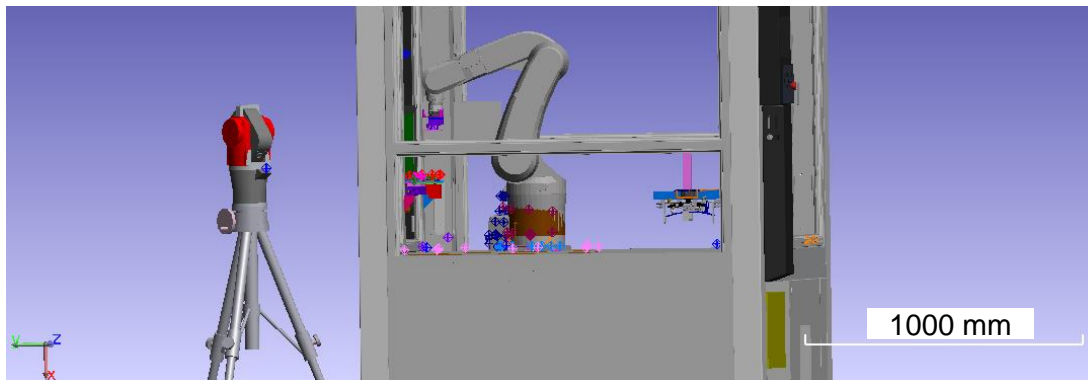
Die offline-Programmierung des CAPM-Prozesses hat den Vorteil, fernab der Zelle gewünschte Beschichtungsprogramme zu erstellen und diese anschließend schnell und einfach auf die Robotersteuerung zu übertragen. Somit sind Stillstandzeiten nur für Rüst- und Wartungsarbeiten erforderlich, was eine ideale Auslastung der Anlagentechnik ermöglicht. Sicherlich ist dies für den Forschungsbetrieb kein entscheidender Faktor, für eine zukünftige Serienanwendung jedoch durchaus von Bedeutung. Offline-Programmierungen setzen eine vollkommene Übereinstimmung der Konstruktionsdaten mit dem realen Aufbau voraus. Eine Abweichung der realen Umgebung vom dreidimensionalen Modell führt zu einem Versatz der Ist-Bahn gegenüber der programmierten Soll-Bahn. In der Folge werden unerwünschte Bereiche beschichtet. [91; 92]

Im vorliegenden Fall wird eine bestimmte Reverse-Anwendung des Maschinenbaus, der Soll-Ist-Vergleich, angewandt. Hierbei wird ein CAD-Modell der gesamten Prozesszelle erstellt, die Bauteile gefertigt und entsprechend montiert. Anschließend werden alle relevanten Bauteile mit einem Koordinatenmessgerät (KMG, Radian™ Lasertracker, API) [93; 94] vermessen und so die Realpositionen ermittelt. Mit Hilfe einer Software wird auf Basis der ermittelten Realpositionen das CAD-Modell angepasst. Dieses kann anschließend in einem CAM-System weiterverarbeitet werden. [95] In den vorliegenden Forschungsarbeiten wird die CAM-Software FAMOS robotic® (carat robotic innovation GmbH) zur offline-Bahn-programmierung des Industrieroboters verwendet. Mit FAMOS wird die Planung, Simulation, Programmierung und Prozessoptimierung von Roboteranlagen auf Basis von CAD-Daten ermöglicht. FAMOS ist herstellerunabhängig und bietet die Möglichkeit Roboter unterschiedlicher Hersteller mit der gleichen Software zu programmieren. [96]

Der Soll-Ist-Vergleich der CAPM-Prozesszelle erfolgt mit Hilfe des oben genannten KMG. Dieses erreicht innerhalb seines Messbereichs von 100 m eine entfernungsunabhängige Genauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  und kann neben Messaufgaben mit Hilfe eines Visionsystems auch kamerabasiert die Messumgebung erkennen. [93] Neben dem Lasertracker selbst, werden für eine Vermessung ein entsprechendes Softwarepaket (TrackerCal und Spatial Analyzer®, New River Kinematics) benötigt. Dieses ist für die Kalibrierung des KMG sowie für die grafischen 3D-Mess- und Analyseauswertungen zuständig. Ein idealer Beschichtungsprozess setzt die genaue Anordnung von Roboter, Drehteller, Düse und Werkzeugbahnhof voraus.

Da die Messaufgabe für alle Bauteile ähnlich ist, wird diese folgend beispielhaft anhand des Drehtellers beschrieben. Ziel des Messplans ist es, aus den einzelnen Messungen am realen Modell einen Punkt zu konstruieren, der an der Stelle des im

CAD-Modell befindlichen Koordinatensystems liegt. Über die Koordinaten des erstellten Punktes kann im Folgenden das CAD-Modell angepasst werden. Für eine Konstruktion des Punktes im realen Modell werden zunächst die Messungen durchgeführt, wie sie in Abbildung 33 exemplarisch dargestellt sind. Benötigt werden die Drehtellerfläche sowie der Durchmesser. Nach Aufnahme aller Messpunkte und Konstruktion der Referenzpunkte, können die XYZ-Koordinaten relativ zum Weltkoordinatensystem ausgegeben werden. Abschließend erfolgt eine Integration dieser Werte in das vorliegende CAD-Modell.



*Abbildung 33: Schematische Darstellung der Vermessung mit Hilfe des KMG aß*

Beim Erstellen eines Roboterprogramms wird stets bahnweise vorgegangen, wobei die Bahn selbst eine Anreihung von Bahnpunkten darstellt. Der große Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Bahnpunkte einzeln oder in einer Bahn automatisiert erzeugt werden können, ohne jeden Punkt einzeln setzen zu müssen. In den vorliegenden Untersuchungen wird das Bauteil unter der feststehenden Plasmadüse bewegt. Das Erstellen einer neuen Bahn ist in FAMOS sehr einfach über eine Fangfunktion der gewünschten Arbeitsfläche möglich. Auf der gewählten Oberfläche wird ein Punkteraster angezeigt, mit welchem die Positionen, die letztendlich die Bahn darstellen, gefangen werden können.

Prozessparameter sind Stellgrößen, die das Verhalten des Roboters an einem spezifischen Bahnpunkt beeinflussen. Diese voreingestellten Werte können in Bezug auf die Achskonfiguration, Prozessgeschwindigkeit sowie die referenzierten Koordinatensysteme verändert werden. Hierbei ist eine Änderung pro markierten Bahnpunkt oder für eine komplette Bahn möglich. Die Umsetzung solcher Stellgrößen setzt die Masterfunktion des Roboters voraus. Im Wesentlichen gliedert sich die Programmierung stets in folgende fünf Arbeitsschritte:

- Aufbau der Simulation
- Programmierung der Bewegung
- Einstellen der Prozessparameter
- Simulation des erstellten Programms
- Erzeugen des Roboterprogramms und Übertragung auf die Steuerung

Der Aufbau der Simulation ist stets identisch, da die gleiche Prozesszelle für alle Untersuchungen verwendet wird. Lediglich die Rüstung des Greifers, Vakuumsauger oder Heiztisch, und die CAD-Daten der verwendeten Baugruppe müssen importiert werden. Die Programmierung der Bahn orientiert sich an der gewünschten Beschichtung. Wie bereits in Kapitel 2.3 angesprochen, können sowohl vollflächige Beschichtungen als auch Einzelstrukturen erzeugt werden, was durch die Lage der erstellten Bahnen zueinander realisiert wird. Im nächsten Schritt erfolgen die Definition der Prozessgeschwindigkeit und der Bewegungsablauf des Roboters. Ebenso werden spezifische Befehle des Roboters an die CAPM-Prozesseinheit, die Prozesszelle und das Pyrometer an entsprechender Stelle in den Programmablauf integriert. Vor der Konvertierung in den Maschinencode erfolgt eine Simulation des kompletten Ablaufes, um etwaige Fehler beim Bewegungsablauf zu detektieren. Die Übertragung per Ethernet-Schnittstelle auf die Steuerung schließt die offline-Programmierung ab. Der Programmaufruf erfolgt über das KCP.

### **3.3 Anlagenkonzept für die Serienfertigung**

Der Einsatz der CAPM-Technologie in einer herkömmlichen Serienfertigung erfordert eine Erweiterung bzw. Modifikation des vorgestellten Anlagenkonzeptes. Abhängig von der zu fertigenden Applikation können sich hier erhebliche Unterschiede ergeben. Im Wesentlichen sind hiervon die Pulverzufuhr, die Losgröße und die Absaugung betroffen, weshalb im Folgenden verschiedene Konzepte vorgestellt werden.

#### **Modifikation der Pulverzufuhr**

Wie bereits in Kapitel 3.1 angedeutet, ist die Pulverprozesseinheit des aktuellen Systems PPE V1 nicht für eine Serienanwendung der CAPM-Technologie geeignet. Vor allem die Limitierung in der Pulvermenge pro Kartusche, das manuelle Nachfüllen und die fehlende Mengenkontrolle sind für eine industrielle Fertigung untragbar. Folglich ist eine Erweiterung der Pulverprozesseinheit auf das System PPE V2 bzw. V3 oder die Integration eines alternativen Systems zwingend erforderlich.

#### **Erweiterung der Anlagentechnik**

Der aktuelle Aufbau ist für die Aufnahme und Handhabung einzelner Substrate konzipiert, was bei einer Verarbeitung hoher Stückzahlen einen hohen Rüstaufwand bedingt. In Verbindung mit Prozessstillstandzeiten während des Substratwechsels ist eine wirtschaftliche Fertigung nicht realisierbar. Abhängig von der Größe der Substrate können mehrere Konzepte einzeln oder kombiniert verfolgt werden:

- Bearbeitung im Nutzen
- mehrere Handhabungssysteme
- mehrere Plasmadüsen

Die Verwendung von Nutzenträgern stellt eine einfache Möglichkeit dar, mehrere Substrate in einem Prozessdurchlauf zu beschichten. Zudem kann die Rüstung der Nutzenträger separat während des Beschichtungsprozesses erfolgen, wodurch nur

beim Tausch dieser eine Stillstandzeit entsteht. Allerdings sind Limitierungen durch das Gewicht und die Geometrie der Baugruppen gegeben. Eine planare Beschichtung ist sehr einfach im Nutzen darstellbar, da jedes Bauteil mit der entsprechenden Fläche zur Düse hin ausgerichtet werden kann. Im Gegensatz dazu stellt eine Beschichtung mehrerer Substratflächen eine große Herausforderung dar und kann im Nutzen meist nur mit enormem Aufwand vollzogen werden. Eine ähnliche Problematik kann bei einem hohen Gewicht der einzelnen Substrate entstehen. Hierbei ist vor allem die Traglast des Roboters zu beachten, welche durch die Summe schwerer Baugruppen schnell erreicht werden kann. Abhilfe kann durch ein Handhabungssystem mit größerer Traglast geschaffen werden, was aber meist mit höheren Kosten und einem größeren Bauraum verbunden ist. Eine Alternative, vor allem bei schweren Baugruppen, liegt in der Verwendung mehrerer Handhabungssysteme. Parallel arbeitende kooperierende Robotersysteme bieten eine hohe Flexibilität in der dreidimensionalen Bearbeitung von Substratoberflächen. Da eine Rüstung und Bearbeitung stets im Wechsel zweier oder mehrerer Roboter erfolgt, können Stillstandzeiten auf ein Minimum reduziert werden. Als nachteilig sind in diesem Zusammenhang der hohe Investitionsaufwand, der benötigte Bauraum und die komplexe Programmierung zu nennen.

Eine parallele Anordnung mehrerer stationär installierter Plasmadüsen ermöglicht sowohl einen höheren Durchsatz an Baugruppen, als auch eine Erweiterung der Beschichtungsflexibilität. Vor allem im Hinblick auf eine mehrlagige Beschichtung, bestehend aus verschiedenen Metallen, ist diese Vorgehensweise sinnvoll. Beispielsweise kann eine Plasmadüse für die Kupferbeschichtung und eine weitere für eine anschließende Passivierung mit Zinn installiert werden. Die Zuführung des Pulver-Gas-Gemisches zu den jeweiligen Düsen kann durch die Pulverprozesseinheiten PPE V2/V3 getrennt und mit separaten Einstellungen erfolgen. Eine Umsetzung dieser Variante erfordert pro Plasmadüse einen separaten Plasmaerzeuger, welcher jedoch im gesamten Anlagensystem einen vernachlässigbaren Kostenfaktor darstellt.

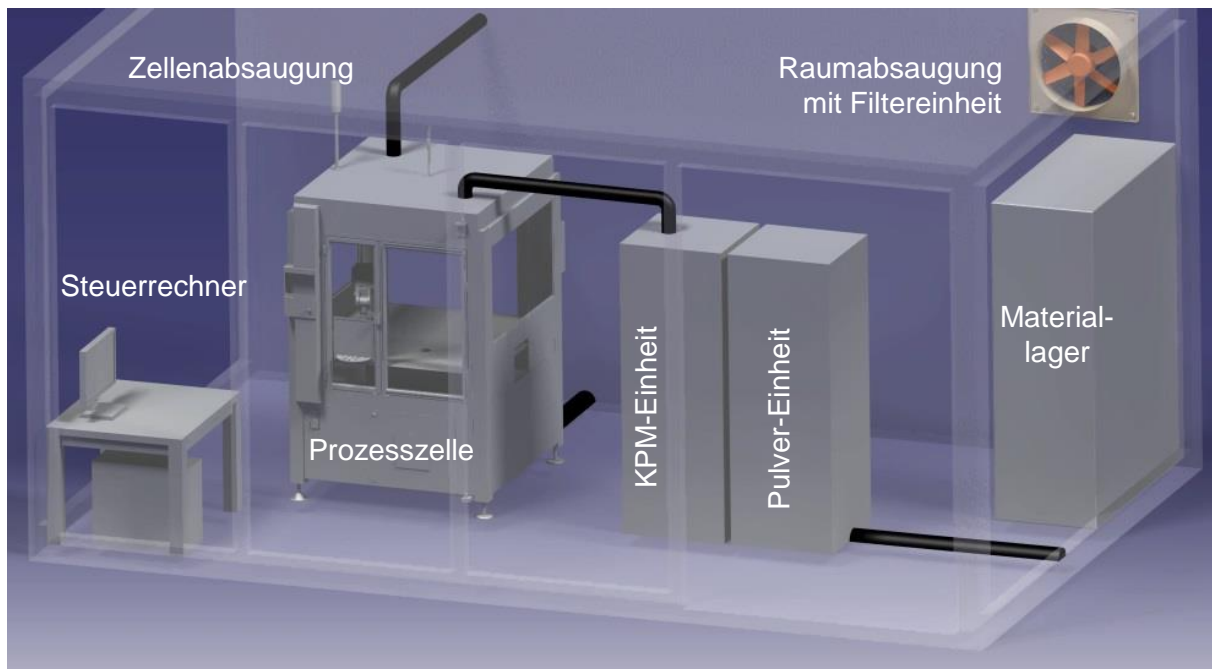
Eine Kombination der drei genannten Varianten untereinander kann weitere Vorteile hinsichtlich Minimierung der Stillstandzeiten und Erhöhung des Durchsatzes mit sich bringen, ist gleichzeitig aber mit jeweils steigenden Investitionskosten verbunden. Eine Integration von je zwei Knickarmrobotern und Plasmadüsen zur Kupfer- und Zinnbeschichtung stellt beispielsweise eine ideale Kombination zur Erzeugung leitfähiger Strukturen dar. Die Stillstandzeiten können hierbei sogar komplett vermieden werden, da die drei kooperierenden Roboter in chronologischer Abfolge eine Kupfer- und Zinnbeschichtung durchführen und anschließend neue Baugruppen gerüstet werden. Zusammenfassend ist die Wahl des geeigneten Anlagenkonzeptes sehr stark an die vorliegende Applikation und deren Stückzahl gebunden.

### **Modifikation der Anlagenperipherie**

Die Realisierung eines serientauglichen Abluftsystems ist unabhängig von der vorliegenden Applikation zu betrachten. Einzig die Leistungsfähigkeit ist bezogen auf die



Größe der Bearbeitungszelle anzupassen. Das verwendete Konzept des laminaren Luftstromes verbunden mit einem Filtersystem kann im größeren Maßstab auch serientauglich eingesetzt werden. Einzige Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Kapselung der Zelle und geeignete Filtersysteme mit einem separaten Auffangbehälter für das abgesaugte Metallpulver. Bei Verwendung mehrerer Metallpulver in einer Prozesszelle ist eine gemeinsame Absaugung des Pulvergemisches die Folge. Eine Trennung der einzelnen Bestandteile ist in einem anschließenden Recyclingverfahren möglich. Neben einer geeigneten Absaugung zum Schutz der Umwelt gegenüber den Prozessemissionen wird eine Kapselung der kompletten Anlage, CAPM-Prozesseinheit und Bearbeitungszelle, gegenüber der restlichen Fertigung angeraten. Eine Kontamination der Umgebung durch die sehr feinen Pulverstäube kann infolge von Wartungs- oder Rüstarbeiten, die ein Öffnen der Zelle voraussetzen, nicht verhindert werden. Folglich sind aus sicherheitstechnischen Aspekten stets ein geeigneter Atemschutz und Schutzhandschuhe bei Tätigkeiten in der Nähe oder an der Prozesszelle zu tragen.



*Abbildung 34: Konzept einer separierten CAPM-Anlagentechnik*

Ein mögliches Konzept sieht die CAPM-Anlage in einem separaten Raum mit eigenem Lüftungssystem und entsprechendem Unterdruck vor. Die Zufuhr notwendiger Betriebsmittel kann durch herkömmliche Zuleitungen erfolgen. Abbildung 34 bildet ein mögliches Konzept einer separierten CAPM-Anlage ab. Alle zur Fertigung erforderlichen Komponenten befinden sich in einem gekapselten Raum mit eigener Absaugung. Der vorliegende Unterdruck verhindert ein Austreten der Metallpartikel. Die notwendigen Betriebsmittel (Gase, Strom) werden von außen zugeführt. Abhängig vom jeweiligen Fertigungsprodukt kann eine automatisierte Bauteilzufuhr eingerichtet werden, die mittels Schleusen einen Transport in die und aus der Prozesszelle ermöglicht. Ebenso können die Proben in einem Materiallager direkt im gekapselten

Arbeitsbereich aufbewahrt werden. Dieses Konzept ermöglicht eine Ausstattung mit unterschiedlichsten Anlagensystemen der CAPM-Technologie. Von der Kleinserie mit einem Handhabungsgerät innerhalb der Prozesszelle über mehrere kooperierende Roboter bis hin zu mehreren Bearbeitungszellen. Das Potential der CAPM-Technologie ist vielseitig einsetzbar.

## 4 Charakterisierung und Prozessoptimierung der CAPM

Die Variabilität der CAPM-Technologie bezogen auf die Wahl des Substratmaterials macht eine Vorauswahl relevanter Werkstoffe für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit erforderlich. Bezugnehmend auf Kapitel 2.4 werden folgende Materialien betrachtet:

- thermoplastischer Kunststoff
- Faserverbundwerkstoffe
- technische Keramik
- Siliziumhalbleiter

Die Charakterisierung und Optimierung der Kupferbeschichtung erfolgt auf Basis der in Abbildung 9 aufgezeigten Einflussfaktoren, mit dem Ziel Schichteigenschaften und Qualitäten in Abhängigkeit der verwendeten Substratmaterialien und der jeweiligen Anwendung zu optimieren. Zusätzlich wird der Zusammenhang der Prozessparameter untereinander und deren Einfluss auf die mechanischen, elektrischen und geometrischen Eigenschaften der Schicht erarbeitet.

### 4.1 Thermoplastische Kunststoffe

Aufgrund des großen Portfolios an Kunststoffen mit jeweils differierenden Eigenschaftsprofilen ist die richtige Wahl nicht trivial. Neben Standardkunststoffen, (z. B. PVC), hat sich das Angebotsspektrum, speziell an MID-geeigneten Formmassen, in den letzten Jahren vermehrt mit leistungsfähigeren technischen Kunststoffen (z. B. PA) und zahlreichen Hochleistungspolymeren (z. B. LCP, PPS) vergrößert. Folglich wird die Wahl eines Kunststoffes nicht mehr nur aus technischer Sicht, sondern auch bezüglich Kompatibilität, Verarbeitung, Ökologie und Wirtschaftlichkeit getroffen. Abbildung 35 gibt einen Überblick über einige relevante Eigenschaften, die speziell für eine Verwendung in der MID-Technik relevant sind. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang die Kombination aus mechanischen, thermischen und elektrischen Verhalten. Die spezifischen Eigenschaften von Kunststoffen variieren abhängig der vorliegenden Temperatur, was die Wahl basierend auf der thermischen Belastung während der Fertigung und im späteren Einsatz beeinflusst. Relevante Größen sind hierbei die Glasübergangstemperatur  $T_g$  und die Schmelztemperatur  $T_M$ . Neben diesen thermischen Kennwerten ist das thermische Ausdehnungsverhalten von Kunststoffen zu beachten. Besonders die Glasübergangstemperatur zahlreicher technischer Kunststoffe (PA, PBT), meist im Bereich von  $-20\text{ °C}$  bis  $100\text{ °C}$ , führt bei Verarbeitung und Gebrauch teilweise zu sprunghaften Änderungen der Ausdehnungskoeffizienten. Die Verbindung von Kunststoffen mit Metallen kann aufgrund der sehr unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten Spannungszustände induzieren. Ein Reißen der auf der Oberfläche generierten Metallschichten oder eine Verminderung der Haftfestigkeit stellen mögliche Folgen dieses Effekts dar. [4]

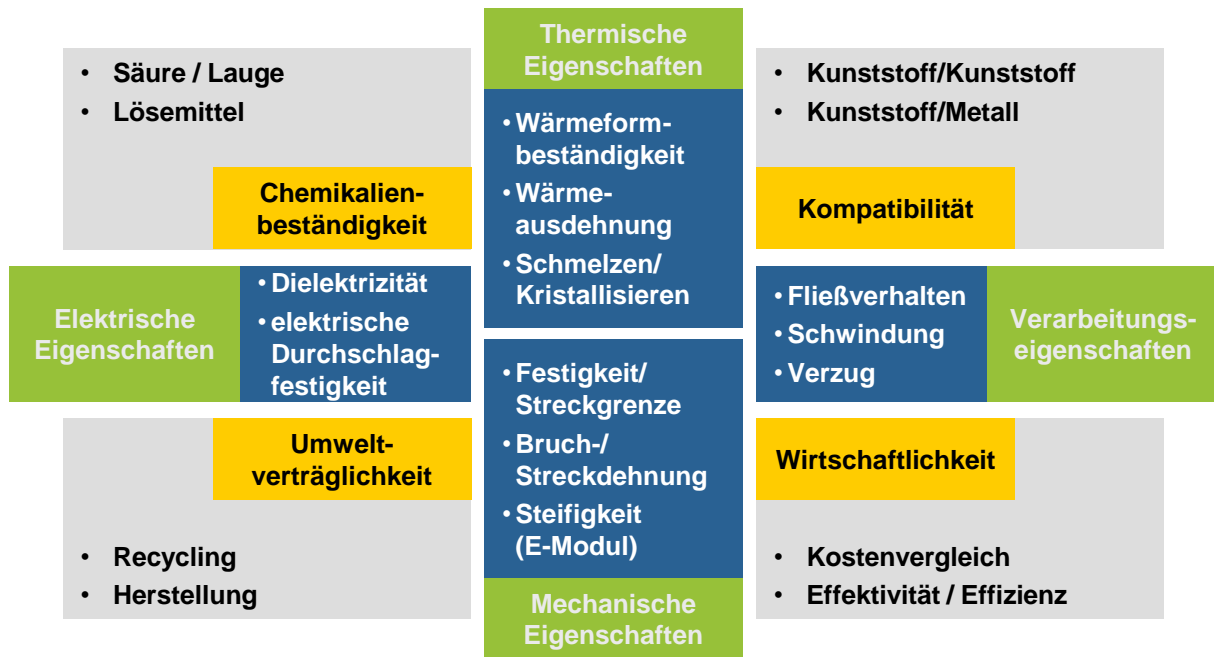


Abbildung 35: Mögliche Anforderungskriterien an Kunststoffe nach [4]

Die ausgezeichneten Isolationseigenschaften machen Kunststoffe zu beliebten Substratwerkstoffen in elektrischen Anwendungen. Ähnlich den mechanischen und thermischen Eigenschaften können auch die elektrischen Kennwerte abhängig vom spezifischen Kunststoff sehr stark variieren. Entscheidende Faktoren sind in diesem Zusammenhang der Durchgangs- bzw. Oberflächenwiderstand, die Durchschlagfestigkeit und das elektrostatische Verhalten. Polyamide stellen einen der wichtigsten und größten Bereiche der thermoplastischen Kunststoffe dar. Teilweise können einige Polyamid-Formmassen sogar Eigenschaftsprofile von Hochleistungskunststoffen erreichen. Zusätzlich zeichnet sie eine hohe mechanische Belastbarkeit und eine chemische Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln aus. Die Schmelztemperaturen bewegen sich in Abhängigkeit des verwendeten Basispolymers (PA6, PA612 oder PA12) im Bereich von 180 °C bis 260 °C. Einzig die Neigung zur teilweisen hohen Wasseraufnahme von maximal 10% ist als nachteilig zu bewerten. In Folge zahlreicher Möglichkeiten der Typenauswahl und Anpassungsmöglichkeiten sind Polyamide aktuell ein beliebter Konstruktionswerkstoff. Die Einsatzgebiete reichen von Fasermaterialien in der Textilindustrie über die Herstellung von Kletterseilen und Hochseeschlepper-Trossen bis hin zu zahlreichen technischen Anwendungen im Haushalts- und Automobilbereich (Gehäuse, Motorabdeckungen, Zahnräder). [97] Die Kombination aus mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften, relativ niedrige Materialkosten und eine hohe Einsatzvielfalt stellen die Hauptgründe für die Wahl von Polyamid für die folgenden Untersuchungen dar.

Das verwendete Polyamid (VESTAMID® D, Evonik Industries AG) zeichnet sich durch hohe Zähigkeit, hohe Rückstellelastizität und eine sehr gute Spannungsrissbeständigkeit aus. Letztere ist vor allem für den Einsatz im Plasmabeschichtungsprozess von Vorteil, um oberflächliche Risse infolge der thermischen Belastung zu ver-

meiden. [98; 99] Tabelle 2 zeigt ausgewählte Stoffeigenschaften des Substratmaterials. Auffällig ist die hohe Schmelztemperatur in Verbindung mit der geringen Längenausdehnung, obwohl der Kunststoff keine Glasfaserfüllstoffe zur Stabilisierung enthält. Infolge dessen ist von einer höheren Wärmeformbeständigkeit auszugehen, was sich positiv auf die Schichtherstellung infolge einer höheren möglichen Beschichtungstemperatur auswirken kann.

*Tabelle 2: Auszug aus den Materialeigenschaften des verwendeten Polyamids [98; 99]*

	VESTAMID® D
Polyamidgruppe	PA 612
Schmelztemperatur $T_M$ in °C	215
Längenausdehnungskoeffizient in $10^{-4}/K$	0,5 - 1,7
Zugmodul in Mpa	2200
Wasseraufnahme in %	1,0 - 2,7

Die Vorbereitung der Kunststoffsubstrate für die vorliegenden Forschungsarbeiten setzt einheitliche Abmessungen zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse voraus. Folglich werden alle Substrate für den Kupferbeschichtungsprozess entsprechend den Maßen von 60 mm x 35 mm (L x B, siehe Abbildung 14) aus 4 mm Plattenmaterial zugeschnitten. Die Kupferbeschichtung der genannten thermoplastischen Substrate umfasst einen breiten Parameterbereich, welcher in Tabelle 3 dargestellt ist.

*Tabelle 3: Mögliche Variation der Prozessparameter*

Prozessparameter	Wert
Leistung in W	1000 - 2000
Pulverdruck in bar	1,2 - 1,8
Gasflussrate in l/min	35 - 60
Abstand Substrat zur Düse in mm	8 - 14
Geschwindigkeit in mm/s	50 - 150
Anzahl an Bahnen	1 - 10

Die Variationsvielfalt an Parametern ist durch mehrere Überlegungen gestützt. Kunststoffe sind im Vergleich zu Keramiken, Faserverbundkunststoffen und Halbleitern eine günstige Materialvariante, was vor allem für Grundlagenbetrachtungen den Vorteil geringer Kosten erlaubt. Des Weiteren können mit geringem Aufwand wechselnde Oberflächenzustände (Rauheit, Verunreinigung) erzeugt werden. Zusätzlich erlaubt es die geringe thermische Leitfähigkeit von Kunststoffen, Verformungen infolge von zu hohen Temperaturbelastungen während der Beschichtung unmittelbar zu erkennen. Verbunden mit einem eindeutig zu definierenden Emissionskoeffizienten können die Prozesstemperaturen an der Kunststoffoberfläche sehr leicht mit dem

Pyrometer ermittelt werden. Zusammenfassend weisen Kunststoffe die ideale Kombination auf, um erste Erfahrungen mit der CAPM-Technologie zu sammeln und den Einfluss der unterschiedlichen Prozessparameter auf die Haftzugfestigkeit, die generierte Schichtdicke, die Porosität und Stromtragfähigkeit zu evaluieren.

### **Variation der Energiezufuhr**

Infolge einer reduzierten Energiezufuhr von 50% der Gesamtleistung (1000 W) ist deutlich ein unregelmäßiges Zünden der Plasmaflamme zu erkennen. Eine ausreichende Haftung zwischen Kupferbeschichtung und Substratoberfläche ist nicht gegeben, sondern es bildet sich eine lose Kupferpulverbestäubung aus. Die geringe Energiezufuhr bedingt eine nicht ausreichende Versorgung des Plasmas mit elektrischer Energie. Folglich wird das Plasmagas nicht durchgehend ionisiert, was eine konstante Energieübertragung des Plasmas auf die Pulverpartikel unmöglich macht. In Verbindung somit dem gepulsten Betrieb ist die thermische Energie für ein Anschmelzen des Pulvers nicht ausreichend. Eine Erhöhung auf 75% der Gesamtleistung (1500 W) zeigt eine deutliche Verbesserung. Allerdings ist der Anteil an losen Kupferpartikeln auf der Substratoberfläche deutlich erkennbar und die konstante thermische Energieübertragung weiterhin schwankend. Zusammenfassend ist beim Kupferbeschichten mit dem CAPM-Verfahren von einer Variation der Energiezufuhr gänzlich abzuraten. Da die beobachteten Effekte unabhängig von Substrat und Handhabungssystem erfolgen ist eine Übertragung der Ergebnisse auf alle weiteren Untersuchungen ohne Einschränkungen möglich. Folglich wird in allen weiteren Forschungsarbeiten stets eine maximale Energiezufuhr und somit eine Leistung von 2000 W für die Plasmaerzeugung verwendet.

### **Einfluss des Pulverdrucks**

Grundsätzlich kann der Parameter Pulverdruck am vorliegenden CAPM-System im Bereich von 0,8 bar - 2,0 bar variiert werden. Hierbei wird der Druck des Trägergas-Pulvergemisches bestimmt, bei welchem dieses von der Pulverdispergiereinheit in die Plasmadüse gelangt. Die jeweilige Einstellung erfolgt an der CAPM-Steuer-einheit. In den vorliegenden Untersuchungen wird der Einfluss des Pulverdrucks auf die Prozesstemperatur betrachtet, welche wiederum Auswirkungen auf die thermische Belastung des Substrates und die Schichtbildung hat. Die Prozesstemperatur wird stets an der Kontaktstelle zwischen Pulver-Gas-Gemisch und Substratoberfläche gemessen. Hierfür wird das in Kapitel 3.3 installierte Laserpyrometer verwendet. Bei einer Erhöhung des Pulverdrucks wird eine größere Menge Kupferpulver in der gleichen Zeit in die Plasmadüse gefördert. Folglich wird die vorliegende Plasmaenergie auf eine höhere Anzahl an Partikel verteilt, was eine geringere Erwärmung der einzelnen Partikel bewirkt. In Abbildung 36 ist anhand von zwei unterschiedlichen Pulverdrücken der thermische Verlauf über die Prozessgeschwindigkeit, welche die Bahngeschwindigkeit des Tool Center Point (TCP) des 6-Achs-Gelenk-Roboters beschreibt, hinweg aufgezeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein höherer Pulverdruck stets mit einer geringeren Prozesstemperatur korreliert. Begründet liegt

dieses Verhalten in der Energie-Transfer-Theorie aus Kapitel 2.2.2. Die Energie des Prozesses ist nach den vorangegangenen Untersuchungen stets konstant, wodurch bei einem erhöhten Pulverdruck eine größere Menge an Metallpulver in der gleichen Zeit erwärmt werden muss. Das gleiche Verhalten ist für die Prozesstemperatur festzustellen. Auch diese nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit stetig ab, was eindeutig auf den reduzierten thermischen Energieeintrag zurückzuführen ist. Die Standardabweichung steigt mit Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit stetig an. Diese marginale Änderung kann mit der Messwerteaufnahme durch das Pyrometer begründet werden. Hierbei erfolgt bei konstanter Messfrequenz eine Reduzierung der Messwerte bei steigender Geschwindigkeit, was sich in einem ungenaueren Messergebnis widerspiegelt.

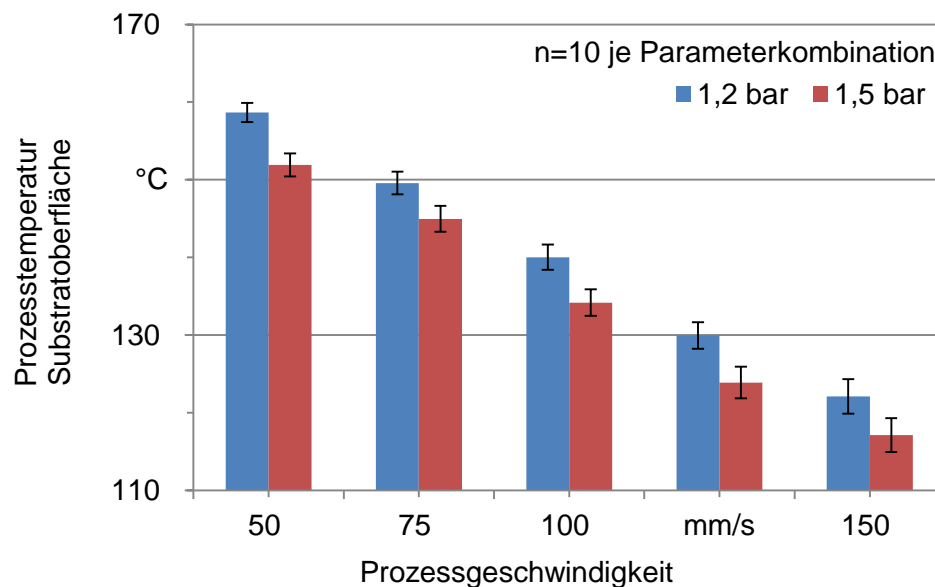


Abbildung 36: Einfluss des Pulverdrucks und der Prozessgeschwindigkeit auf die Prozesstemperatur

Das Beschichtungsergebnis zeigt bei einer weiteren Erhöhung des Pulverdrucks (1,8 bar) eine verminderte Haftung der Pulverpartikel, was ebenfalls mit der Energielimitierung des Gesamtprozesses korreliert. In nachfolgenden Untersuchungen wird sowohl auf die Zusammenhänge zwischen der Prozessgeschwindigkeit und der Temperatur, als auch die thermischen Auswirkungen der einzelnen Faktoren, detaillierter eingegangen.

### Variation der Gasflussrate

Die Gasflussrate stellt einen zentralen Parameter des CAPM-Verfahrens dar, der bei vorliegendem Anlagensystem im Bereich von 35 l/min - 80 l/min variiert werden kann. Mit Verweis auf Kapitel 2.2.1 ist die Wahl des Trägergases bzw. des Trägergas-Gemisches ausschlaggebend für die generierte Plasmaenergie und somit auch die Prozesstemperatur. Die folgenden Untersuchungen basieren auf reinem Stickstoff als Prozessgas. Eine zunehmende Erhöhung des Gasflusses führt zu einer entsprechenden Verminderung der Prozesstemperatur, was in Abbildung 37 deutlich an der

Trendlinie zwischen den einzelnen Messwerten ersichtlich ist. Eine Erhöhung der Gasflussrate bei konstanter Leistung hat somit eine Reduzierung der Plasmatemperatur zur Folge, da die gleiche Energiemenge auf eine höhere Anzahl an Gaspartikeln verteilt wird. Folglich findet ein verminderter Energietransfer vom Plasma-gas auf das eingebrachte Metallpulver statt, was zu einer reduzierten Prozesstemperatur führt.

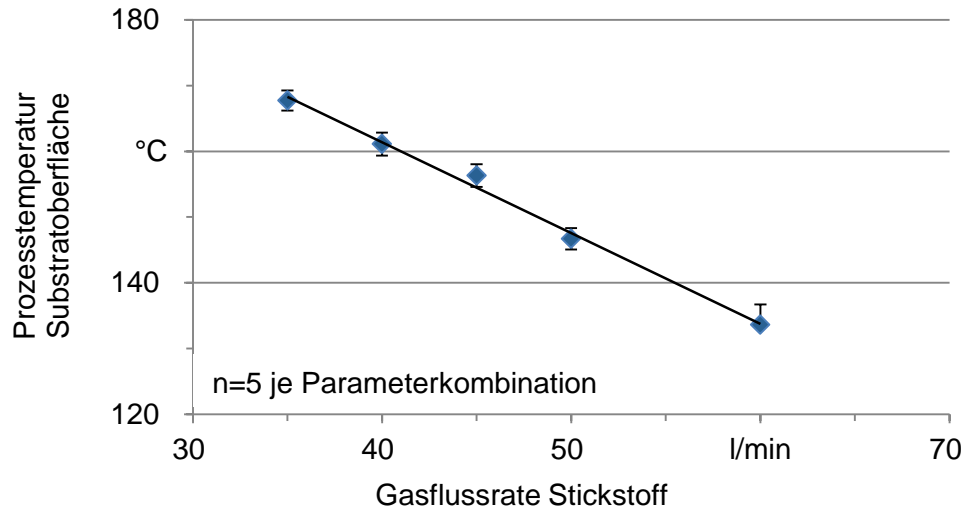


Abbildung 37: Einfluss der Gasflussrate auf die Prozesstemperatur

Neben dem thermischen Einfluss hat eine Steigerung der Gasflussrate auch Auswirkungen auf die geometrische Ausprägung und die Qualität der generierten Kupferstrukturen (siehe Abbildung 38).

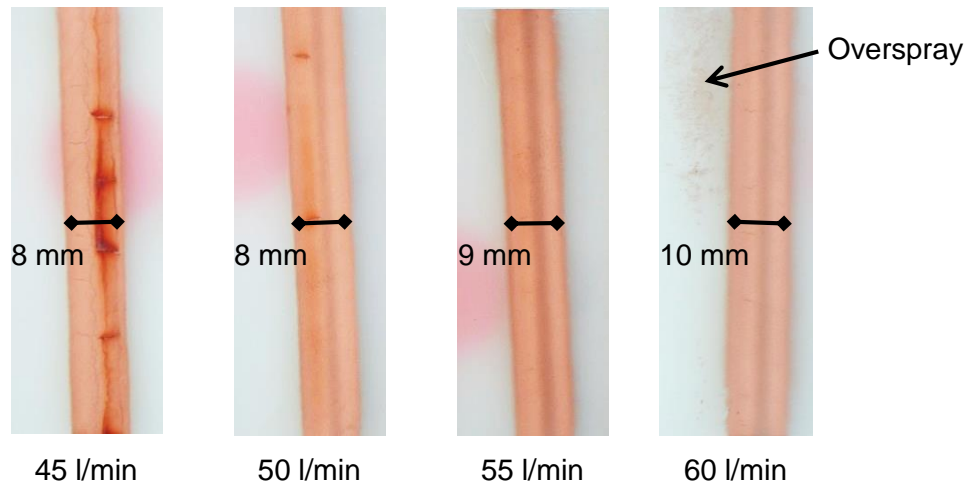


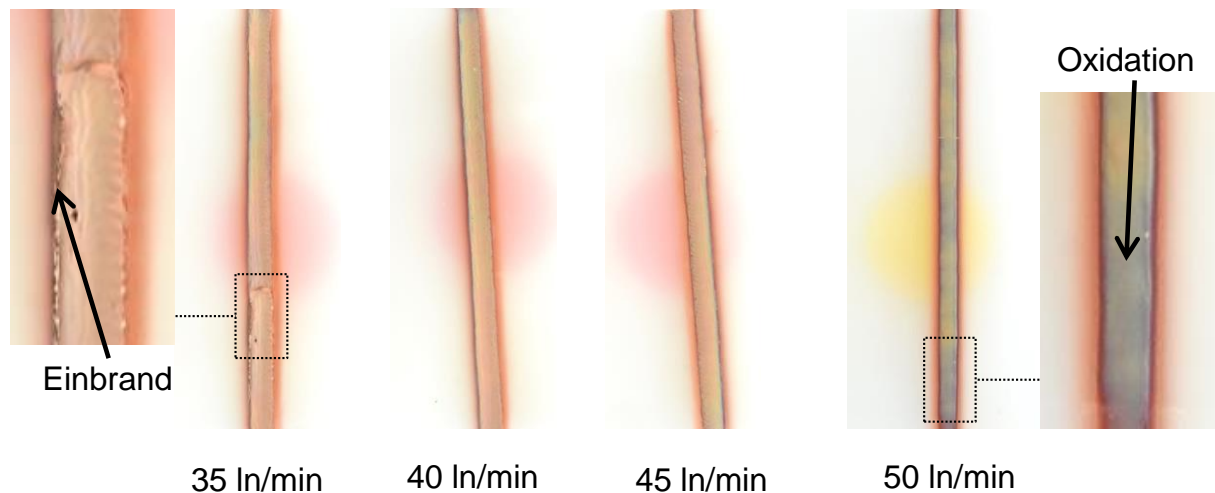
Abbildung 38: Versuchsergebnisse auf Basis differierender Gasflussraten [58]

Die Leiterbahnbreite korreliert mit der Gasflussrate und nimmt bei Erhöhung stetig zu. Zusätzlich tritt bei höheren Werten ein Overspray-Effekt ein, welcher auch aus dem AJ-Verfahren bekannt ist. [100] Dieser ist im vorliegenden Fall eindeutig auf eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit verbunden mit einer zu geringen thermischen Energie der Pulverpartikel zurückzuführen. Eine ausreichende Haftung der Partikel ist nicht realisierbar und spiegelt sich somit in einer Art Bestäubung wieder, welche



durch die hohe Gasgeschwindigkeit über die gesamte Probenoberfläche verteilt wird. Die Zunahme der Leiterbahnbreite ist auf die Spreizung des Trägergas-Pulver-Gemisches nach dem Verlassen der Plasmadüse zurückzuführen. Der kegelförmige Beschichtungsspot (siehe Abbildung 8) weitet sich bei zunehmender Gasflussrate aus. Hierbei könnte eine Fokussierung durch eine verbesserte Düsengeometrie oder ein zusätzliches Fokussierungsgas eine Verbesserung hinsichtlich Overspray bewirken.

Die optimale Kombination aus Pulverdruck und Gasflussrate stellt eine Basis-konfiguration des CAPM-Prozesses dar. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Erhöhen des Pulverdrucks mit einer Verringerung der Prozesstemperatur und der Haftung einhergeht. Zusätzlich tritt vermehrt Overspray auf. Ein ähnliches Verhalten ist bei einer Zunahme der Gasflussrate zu erkennen. Eine sinnvolle Begrenzung des Versuchsumfangs setzt eine klare Definition der beiden Parameter voraus. Die Gasflussrate wird für die folgenden Untersuchungen auf 45 l/min festgelegt. Grundlage hierfür sind die Versuchsergebnisse in Abbildung 39.



*Abbildung 39: Versuchsergebnisse unterschiedlicher Gasflussraten*

Bei einer Gasflussrate von 35 l/min ist ein starkes Einbrennen der Kupferpartikel an den Rändern der Kupferstrukturen infolge der hohen thermischen Energie zu erkennen. In Verbindung mit den hohen Prozesstemperaturen aus Abbildung 37 ist dieser Parameter in der Summe der Ergebnisse nicht relevant für die Beschichtung der vorliegenden PA-Substrate. Ebenfalls nicht geeignet ist eine Durchflussrate von 50 l/min, welche ein geringes Verschmelzen der einzelnen Partikel untereinander infolge der reduzierten Prozesstemperatur aufweist. Zudem bieten die einzelnen Partikel in Summe eine große Oberfläche, die in Kombination mit der Umgebungsluft und der hohen Oxidationsneigung von Kupferpulver zum vorliegenden Ergebnis beitragen. Einzig die beiden Parameterstufen 40 l/min und 45 l/min stellen eine geeignete Kombination aus Prozesstemperatur und Qualität der erzeugten Kupferstrukturen dar. Hierbei ist die Oxidation der Leiterbahn auf ein Minimum reduziert und eine durchgängige Kupferstruktur erkennbar. Die finale Wahl liegt in Empfehlungen des

Anlagenherstellers und der geringeren Prozesstemperatur bei vergleichbaren Ergebnissen begründet. Die Abstimmung des richtigen Pulverdrucks auf die gewählte Gasflussrate erfolgte ebenfalls nach Empfehlungen des Anlagenherstellers in Verbindung mit eigenen Versuchsreihen. Abbildung 40 zeigt exemplarisch je ein Versuchsmuster drei differierender Pulverdrücke. Zwischen den Parametern 1,2 bar und 1,5 bar ist optisch nur ein marginaler Unterschied zu erkennen. Beide zeigen eine durchgängige Leiterbahnstruktur ohne Einbrand oder Fehlstellen. Bei 1,8 bar ist eine deutliche Veränderung der Leiterbahnstruktur zu erkennen. Zwischen den Parametern 1,2 bar und 1,5 bar ist optisch nur ein marginaler Unterschied zu erkennen. Beide zeigen eine durchgängige Leiterbahnstruktur ohne Einbrand oder Fehlstellen.

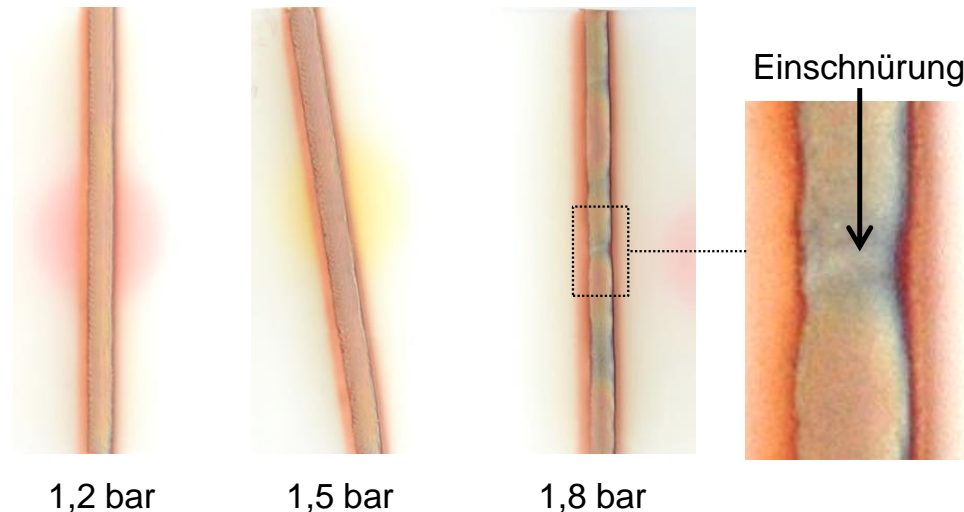


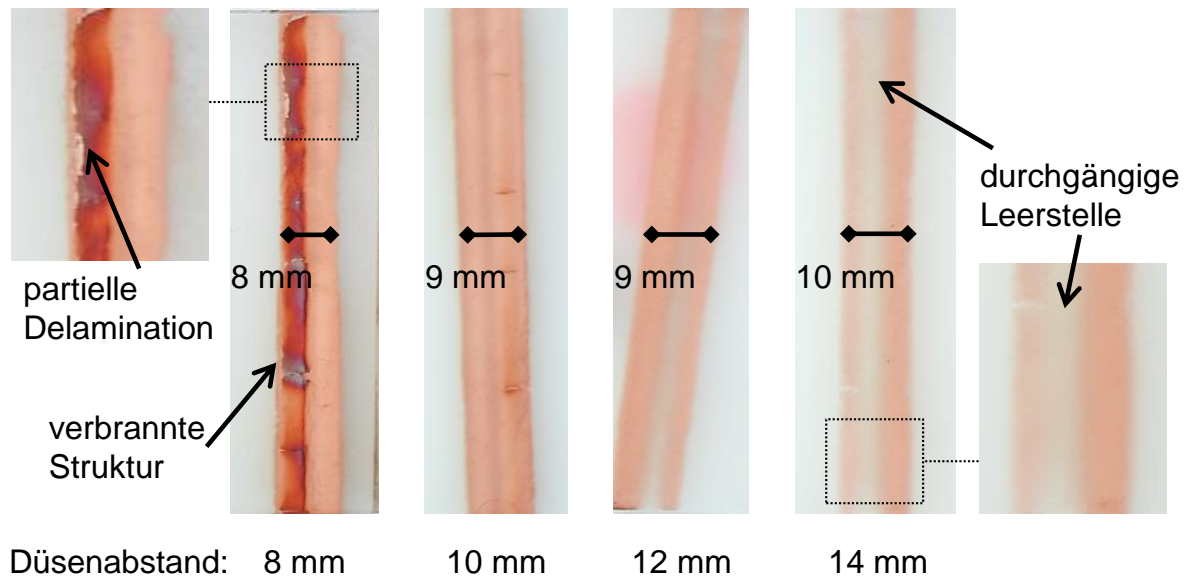
Abbildung 40: Versuchsergebnisse unterschiedlicher Pulverdrücke

Im Gegensatz dazu ist bei 1,8 bar eine deutliche Veränderung der Kupferstrukturen zu detektieren. Vor allem partielle Oxidation und Einschnürungen im Leiterbahnverlauf weisen auf eine ungleichmäßige Pulverversorgung hin. Infolge dieser Unbeständigkeit der Pulverversorgung treten partiell thermische Hotspots auf, da der Energietransfer zwischen Plasmagas und Pulver schwankt. Die Folge sind Einschnürungen in der Leiterstruktur aufgrund der geringeren Pulvermenge verbunden mit erhöhten Oberflächentemperaturen, die ein Oxidieren an diesen Bereichen begünstigen. Die schwankende Pulverzuführung ist der Anlagenkonfiguration aus Dispergierer und Kartuschenreservoir geschuldet und kann im vorliegenden Maschinenequipment nicht geändert bzw. beeinflusst werden. In Verbindung mit einem zunehmendem Overspray werden Pulverdrücke größer 1,5 bar nicht für eine Beschichtung der vorliegenden PA-Substrate verwendet. Bei Pulverdrücken kleiner 1,2 bar kommt es aufgrund der geringeren Pulvermenge und somit höheren Plasmagasenergie zu erhöhten Oberflächentemperaturen. Zusätzlich ist eine geringere Schichtdicke infolge der geringeren Pulvermenge pro Zeit zu erwarten, wodurch eine Wahl dieser Parameter für weitere Untersuchungen nicht in Betracht gezogen wird.

### **Einfluss des Düsenabstandes**

Der Abstand zwischen Düse und Substratoberfläche beeinflusst die Prozesstemperatur und die geometrische Ausprägung der Leiterstrukturen (siehe Abbildung 41). Ein Luftspalt von 8 mm ist nicht ausreichend, um das Trägergas-Pulver-Gemisch nach Austritt aus der Plasmadüse genügend abzukühlen. In Verbindung mit der geringen

Wärmeleitfähigkeit des PA-Substrats kann die thermische Energie nicht abgeführt werden. In der Folge bilden sich verbrannte Kupferstrukturen aus, welche eine erhöhte Oxidation aufweisen. Eine partielle Delamination und ein starkes Einschmelzen der Schicht in die Kunststoffoberfläche können detektiert werden.



*Abbildung 41: Einfluss des Düsenabstandes auf die Kupferstrukturen*

Eine Erhöhung des Abstandes auf 10 mm führt zu einem deutlichen Anstieg in der Beschichtungsqualität. Die generierten Kupferleiterbahnen zeigen eine durchgängige, haftfeste und oxidationsfreie Struktur. Eine weitere Erhöhung des Düsenabstandes erscheint hinsichtlich der dargelegten Ergebnisse nicht interessant, da die Schichten zunehmend dünner werden und Haftungsprobleme aufweisen. Dies ist mit einem zunehmenden Temperaturverlust infolge des erhöhten Luftspalts zwischen Düse und Substrat zu erklären. Gleichzeitig ist eine Zunahme der Breite der erzeugten Strukturen auszumachen. Diese ist, ähnlich der Verbreiterung infolge der Erhöhung der Gasflussrate, auf den kegelförmigen Plasmaspot zurückzuführen. Die folgenden Untersuchungen werden daher mit einem Abstand von 10 mm zwischen Plasmadüse und Substratoberfläche durchgeführt.

#### **Variation der Prozessgeschwindigkeit**

Die Änderung der Bahngeschwindigkeit des TCP, welche in dieser Arbeit mit der Nomenklatur Prozessgeschwindigkeit definiert ist, hat direkten Einfluss auf die Prozesstemperatur, was bereits in Abbildung 36 exemplarisch am Pulverdruck dargestellt wurde. Die Wahl der optimalen Prozessgeschwindigkeit ist von der Beschichtungsstrategie abhängig. Eine geringe Geschwindigkeit bedingt eine hohe thermische Belastung des Substrates, gleichzeitig aber eine höhere Schichtabscheidung. Eine hohe Prozessgeschwindigkeit ist mit einem geringen Schichtaufbau und einer geringeren thermischen Belastung verbunden (siehe Abbildung 36) und erfordert somit eine höhere Anzahl an Beschichtungssequenzen, um eine gewünschte Schichtdicke zu erreichen. Abbildung 42 zeigt deutlich, dass die Schichtdicke annä-

hernd linear mit der Prozessgeschwindigkeit abnimmt. Der Unterschied zwischen den beiden verwendeten Pulverdrücken ist geringer als erwartet. Meist wird mit einem höheren Druck eine höhere Schichtdicke erzeugt, aber vor allem bei 50 mm/s und 150 mm/s entsprechen die Ergebnisse nicht den Erwartungen. Bei 50 mm/s kann der Effekt durch die kinetische Energie des Prozessgas-Pulvergemisches begründet werden. Eine geringe Prozessgeschwindigkeit verbunden mit einem geringen Pulverdruck bedingt eine hohe Beschichtungstemperatur. Folglich können die Kupferpartikel leicht eine gute Haftung zur Substratoberfläche durch Abgabe ihrer thermischen Energie herstellen. Hier ist ein sogenanntes Einschmelzen in die Oberfläche zu erkennen. Gleichzeitig wird die Kunststoffoberfläche partiell infolge der hohen thermischen Energie angeschmolzen und die Kupferpartikel in der Schmelze verankert. Bei einem höheren Pulverdruck ist die thermische Energie des einzelnen Kupferpartikels geringer, was zu einer verminderten Haftung gegenüber der Substratoberfläche und zwischen den Kupferpartikeln selbst führt. Bei mehreren Beschichtungsüberfahrten, wie im vorliegenden Fall, wird infolge der hohen Strömungsenergie in der Plasmadüse ein Teil der schwach haftenden Partikel wieder entfernt.

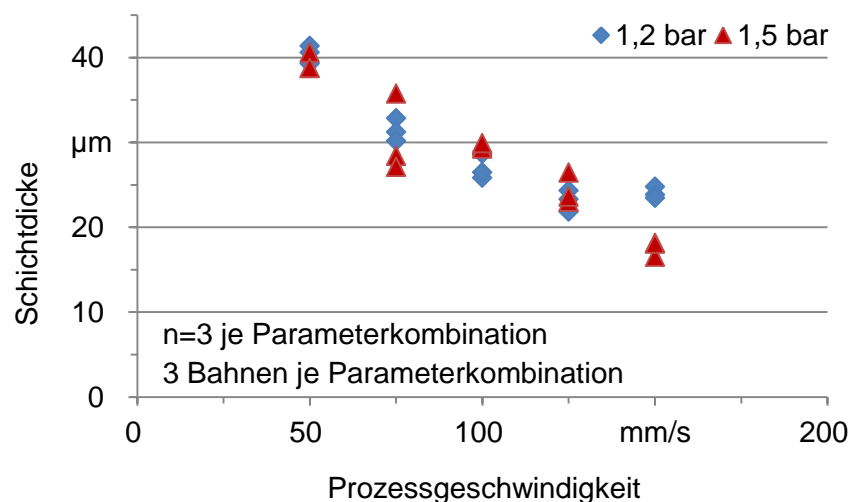


Abbildung 42: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Geschwindigkeit und dem Pulverdruck

Der zweite vorliegende Fall bei 150 mm/s ist ebenfalls auf die kinetische Energie des Beschichtungsprozesses verbunden mit der reduzierten thermischen Energie zurückzuführen. Bei einer hohen Prozessgeschwindigkeit ist die Haftung infolge der geringen Verweilzeit der Plasmadüse pro Fläche verbunden mit einer geringen thermischen Energieübertragung reduziert [31]. Folglich wirken sich oben genannte Effekte umso stärker auf den Schichtaufbau aus, was an den Messwerten deutlich zu erkennen ist.

### Einfluss der Anzahl an Beschichtungsbahnen

Eine Erhöhung der Bahnanzahl ist, wie bereits erwähnt, stets mit einer Zunahme der Schichtdicke verbunden. Gleichzeitig wird infolge der mehrmaligen Überfahrt an identischer Stelle die thermische Belastung auf das Substrat erhöht. Die schlechte

Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen wirkt sich in diesem Zusammenhang positiv auf das Schichtwachstum aus, da die eingebrachte thermische Energie nur sehr langsam abgeführt werden kann und somit die Temperaturdifferenz zwischen den auftretenden Kupferpartikeln und der Substratoberfläche vergleichsweise gering ist. Dies führt zu einer Reduzierung der induzierten Spannungen sowohl in der Leiterbahn als auch zwischen der Substratoberfläche und den Leiterstrukturen, welche direkt proportional zur Temperaturdifferenz auftreten, und somit eine besseren Haftung der einzelnen Partikel untereinander bewirken. Allerdings sind diesem Effekt Grenzen gesetzt. Eine beliebige Erhöhung der Bahnanzahl mit dem Ziel der Maximierung der Schichtdicke ist leider nicht möglich und hat eine Delamination der Schichten zur Folge (siehe Abbildung 43). Die Untersuchungen zeigen eine deutliche Delamination der Kupferstrukturen mit zunehmender Bahnanzahl. In wirtschaftlicher Hinsicht ist eine optimierte Kombination aus angemessener Bahnanzahl und den Parametern Geschwindigkeit, Düsenabstand und Pulverdruck ratsam, um kurze Prozessketten für die gewünschten Schichteigenschaften realisieren zu können. In den bereits genannten und in den folgenden Untersuchungen wird ausschließlich mit drei Überfahrten gearbeitet, da hierbei ausreichende Schichtdicken bei einer geringen thermischen Belastung weit unterhalb der Schmelztemperatur des Substratmaterials erreicht werden.

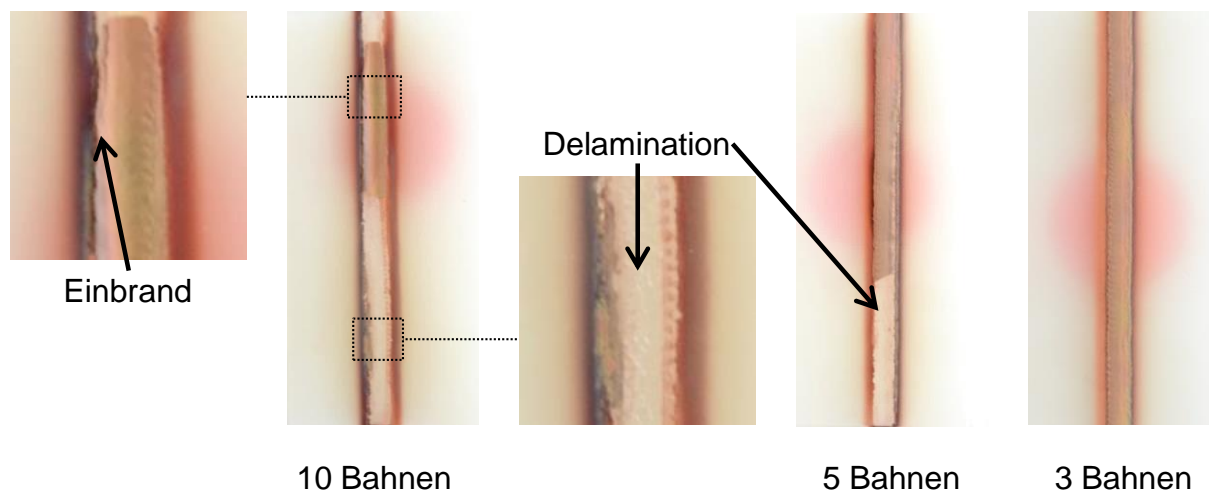


Abbildung 43: Einfluss der Bahnanzahl auf die Haftzugfestigkeit der Kupferstrukturen

Die vorliegenden Grundlagenuntersuchungen zeigen die große Breite der Einflussmöglichkeiten auf die Prozesstemperatur durch Änderung der Prozessparameter Pulverdruck, Gasflussrate, Prozessgeschwindigkeit, Abstand zwischen Substrat und Düse und Anzahl an Beschichtungsbahnen. Da die Temperatur bei der Beschichtung von Kunststoffen den entscheidenden Parameter darstellt, werden im nächsten Schritt quantitative Betrachtungen herangezogen, um den Einfluss der Prozesstemperatur auf die Haftzugfestigkeit, die Schichtdicke, die Porosität und die Stromtragfähigkeit zu evaluieren. In Tabelle 4 sind die Prozessparameter für die Herstellung der Muster zur Bestimmung genannten Qualitätskenngrößen, wie in Kapitel 2.4.3

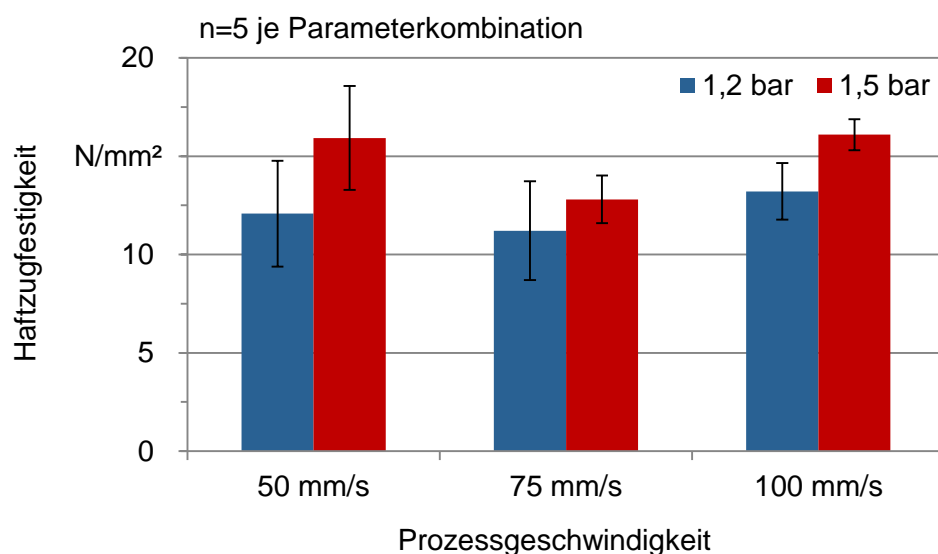
erläutert, angegeben. Zusätzlich wird anhand der umfangreichen Musteranzahl die Reproduzierbarkeit des verwendeten CAPM-Anlagensystems betrachtet.

*Tabelle 4: Prozessparameter für Evaluierungsmuster*

Prozessparameter	Wert
Leistung in W	2000
Pulverdruck in bar	1,2 - 1,5
Gasflussrate in l/min	45
Abstand Substrat zur Düse in mm	10
Geschwindigkeit in mm/s	50 - 100
Anzahl an Bahnen	3

### Bestimmung der Haftzugfestigkeit

Aus Abbildung 44 lässt sich für die Haftzugfestigkeit ableiten, dass diese abhängig vom Pulverdruck und der Prozessgeschwindigkeit differierende Messwerte aufweist. Bei einem niedrigen Pulverdruck sind die Messwerte stets geringer als bei höherem Druck, was auf die größere thermische Belastung der Substratoberfläche zurückzuführen ist. Infolge dieser wird die Grenzfläche Kunststoff-Kupferschicht aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Kunststoffmaterial nachhaltig geschädigt, was sich in einer geringeren Haftzugfestigkeit während des Stirnabzuges widerspiegelt. Ähnliche Erkenntnisse sind in diesem Zusammenhang aus Haftzugfestigkeitsuntersuchungen unter Anwendung von LDS im Bereich der MID-Technik zu erkennen [101; 102; 103; 104]. Bei steigender Prozessgeschwindigkeit ist eine Zunahme der Haftzugfestigkeit zu erkennen, was die These zusätzlich stützt.



*Abbildung 44: Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit und des Pulverdrucks*



Die marginalen Unterschiede in Abhängigkeit von der Prozessgeschwindigkeit von 50 mm/s und 75 mm/s bei einem Pulverdruck von 1,2 bar können auf die Unregelmäßigkeiten der Messwertbestimmung während des Stirnabzugstests zurückgeführt werden, was auch an den wesentlich größeren Standardabweichungen im Vergleich zu 100 mm/s verdeutlicht wird. Bei einem höheren Pulverdruck sind die Abweichungen in der Standardabweichung mit zunehmender Prozessgeschwindigkeit geringer. Des Weiteren ist ein deutlicher Abfall der Messwerte bei 75 mm/s im Vergleich zu 50 mm/s und 100 mm/s auszumachen. Bei einer geringen Prozessgeschwindigkeit ist zwar ausreichend thermische Energie vorhanden, um ein Verschmelzen der größeren Menge an Kupferpartikel untereinander im Vergleich zu einem Pulverdruck von 1,2 bar zu ermöglichen, gleichzeitig wird die Substratoberfläche aber aufgrund der langsamen Beschichtungsgeschwindigkeit thermisch stärker belastet. Dies spiegelt sich in der hohen Standardabweichung wieder. Der Abfall der Messwerte bei 75 mm/s ist folglich nicht auf eine schlechteres Prozessergebnis zurückzuführen, sondern auf eine deutliche Reduzierung der Standardabweichung im Vergleich zu 50 mm/s. Das beste Ergebnis dieser Versuchsreihe weist die Parameterkombination aus einer Prozessgeschwindigkeit von 100 mm/s und einem Pulverdruck von 1,5 bar auf. Hier ist die Haftzugfestigkeit am größten und gleichzeitig die Standardabweichung am geringsten. Folglich ist hierbei eine gleichmäßig ausgeprägte Kupferschicht zu erwarten. Weitere Erkenntnisse hierzu sind den folgenden Untersuchungen in Bezug auf die Porosität zu entnehmen.

Neben der Abhängigkeit der Haftzugfestigkeit vom Pulverdruck und von der Prozessgeschwindigkeit wurde auch die Abhängigkeit vom Düsenabstand näher untersucht. Abbildung 45 zeigt deutlich einen Abfall der Messwerte bei einer gleichzeitigen Zunahme der Standardabweichung infolge einer Erhöhung des Düsenabstandes.

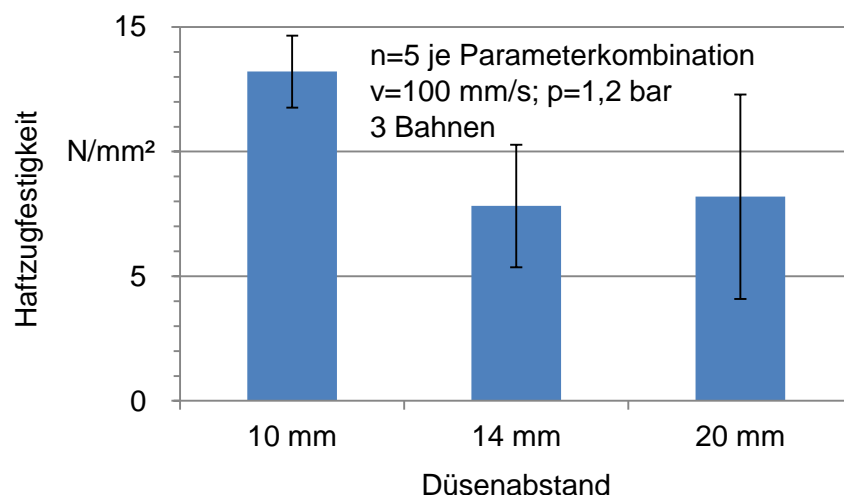


Abbildung 45: Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit des Düsenabstandes

Beide Effekte können mit einer Reduzierung der thermischen Energie an der Substratoberfläche begründet werden. Nimmt die Distanz zwischen Plasmadüse und Substratoberfläche zu, erfolgt eine zunehmende Abgabe an thermischer Energie des

Pulver-Trärgasgemisches an die Umgebungsluft infolge der längeren Flugphase. Gleichzeitig vergrößert sich aufgrund des kegelförmigen Strahlprofils der Plasma-düse die Beschichtungszone auf der Substratoberfläche. Beides führt zu einer Reduzierung des thermischen Energieeintrags und somit zu einer geringeren Haftung zwischen Substratoberfläche und Kupferschicht. Gleichzeitig erfolgt ein vermindertes Verschmelzen der einzelnen Kupferpartikel untereinander, was eine geringere Schichtdicke zur Folge hat. Somit ist eine Vergrößerung des Düsenabstandes aufgrund der niedrigeren Haftzugfestigkeit (siehe Abbildung 45) und der geringen generierten Kupferschichtdicke aus wirtschaftlicher Sicht mit den in dieser Arbeit verwendeten Prozessparametern nicht sinnvoll.

### Bestimmung der Schichtdicke

Die Auswertung der Ergebnisse in Abbildung 46 zeigt deutlich, dass die größte Schichtdicke bei einem Vorschub von 50 mm/s und einem Pulverdruck von 1,2 bar erreicht werden kann. Bei gleichbleibendem Pulverdruck und einer Steigerung der Geschwindigkeit ist ein sehr rasches Absinken der Schichtdicke zu beobachten. Des Weiteren nimmt die Standardabweichung mit zunehmender Prozessgeschwindigkeit zu, was auf eine schlechtere Verbindung der einzelnen Kupferpartikel infolge des sinkenden thermischen Energieeintrages zurückgeführt werden kann. Die Verwendung eines erhöhten Pulverdrucks von 1,5 bar weist in Verbindung mit einer erhöhten Prozessgeschwindigkeit erwartungsgemäß eine Reduzierung der Schichtdicke auf, jedoch in geringerem Maße und einem gleichmäßigeren Abfall. Zudem ist auch hier eine deutliche Erhöhung der Standardabweichung mit zunehmender Beschichtungsgeschwindigkeit auszumachen.

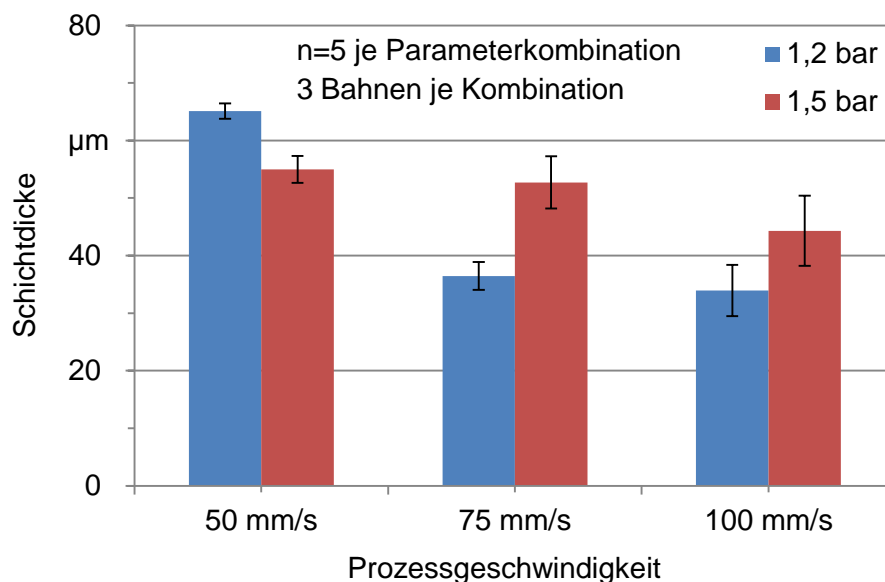


Abbildung 46: Schichtdickenmessung in Abhängigkeit variierender Prozessgeschwindigkeiten und Pulverdrücken

Der ausgeprägte Schichtdickenunterschied der beiden Pulverdrücken ist auf die thermische Energie in Verbindung mit dem Pulverdruck zurückzuführen. Bei einer



Prozessgeschwindigkeit von 50 mm/s ist ausreichend thermische Energie vorhanden, um annähernd alle zugeführten Kupferpartikel bei einem Pulverdruck von 1,2 bar mit der Substratoberfläche zu verschmelzen. Bei einem Pulverdruck von 1,5 bar ist immer noch genügend Energie vorhanden, um den größten Teil der zugeführten Kupferpartikel in die generierte Kupferschicht einzubetten. Die beiden Standardabweichungen stützen diese These. Nimmt die Prozessgeschwindigkeit zu, steht in der Folge weniger thermische Energie zur Verfügung. In Verbindung mit einem geringen Pulverdruck sind weniger Kupferpartikel pro Zeit für die Beschichtung der Substratoberfläche verfügbar, was sich im Vergleich zu einem erhöhten Pulverdruck im dargestellten Schichtdickenunterschied ausprägt. Gleichzeitig zeigen die Standardabweichungen, dass mit einem geringeren Pulverdruck gleichmäßigere Schichtdicken realisiert werden können.

Die vorliegenden Messergebnisse bestätigen somit die vorangegangene Aussage, dass die Schichtdicke bei Reduzierung der Prozessgeschwindigkeit ansteigt. Dies kann sowohl bei 1,2 bar als auch bei 1,5 bar Pulverdruck klar nachgewiesen werden. Die Erhöhung der Geschwindigkeit verdeutlicht die These, dass ein hoher Druck auch zu einer größeren Schichtdicke führt, allerdings unter der Prämisse einer geringeren Reproduzierbarkeit.

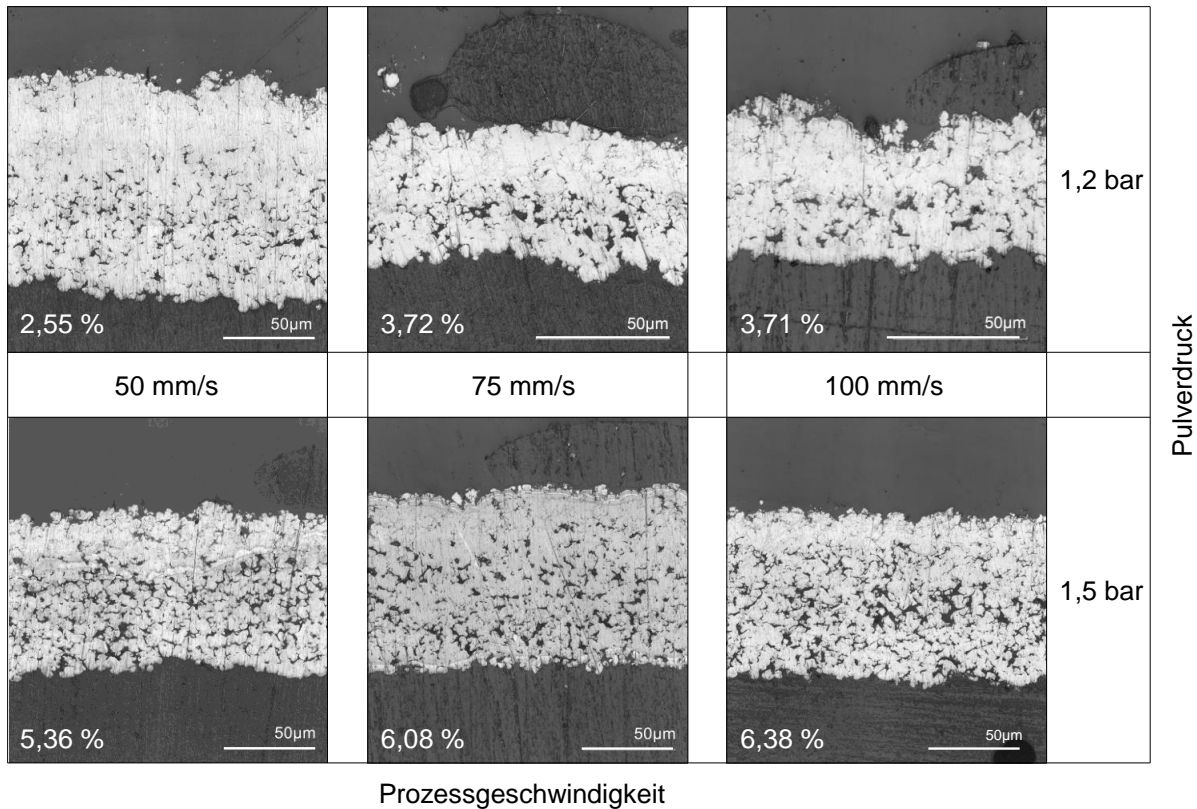
Zusammenfassend bildet die Schichtdickenmessung mit Hilfe der Schliffbilderstellung und anschließenden Laserscanmikroskopie eine sehr genaue Methode ab. Der Umstand der aufwändigen Probenpräparation vor der Vermessung kann aufgrund der multiplen Nutzung der Schliffbilder vernachlässigt werden. Das gleiche Schliffbild kann neben der Bestimmung der Schichtdicke auch zur Vermessung der Porosität und zur Analyse der Haftzugfestigkeit genutzt werden.

#### **Bestimmung der Schichtporosität**

Abbildung 47 zeigt sechs Schliffbilderausschnitte, die sich in Pulverdruck und Prozessgeschwindigkeit unterscheiden. Gleichzeitig ist die entsprechende Porosität je Probekörper angegeben. Die Aufnahmen zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Porosität vom Pulverdruck, was durch die höhere thermische Energie bei niedrigem Pulverdruck eindeutig erklärt werden kann. Mehr Energie bedingt eine bessere Verschmelzung der Kupferpartikel untereinander und somit eine geringere Porosität. Im Gegensatz zum Pulverdruck ist der Einfluss der Prozessgeschwindigkeit deutlich geringer. In der Theorie sollte die Porosität bei geringer Geschwindigkeit aufgrund der höheren thermischen Energie ebenfalls geringer sein. Obwohl eine Tendenz zu erkennen ist, kann diese These anhand der Versuchsergebnisse nicht eindeutig nachgewiesen werden. Vor allem bei Verwendung eines Pulverdrucks von 1,5 bar sind nur marginale Änderungen in der Porosität über alle Prozessgeschwindigkeiten hinweg auszumachen. Im Hinblick auf eine dichte Struktur ist in jedem Fall ein geringer Pulverdruck in Kombination mit einer geringen Prozessgeschwindigkeit anzuraten.

Die Haftzugfestigkeit ist direkt mit der Porosität gekoppelt. Vor allem im Bereich der Grenzschicht Kupfer-Substratoberfläche haben poröse Schichten einen geringen

Messwert zur Folge (siehe Abbildung 7). Eine dichte Kupferstruktur an der Grenzfläche bedingt eine höhere Haftzugfestigkeit infolge der Verklammerung der einzelnen Partikel mit der Oberfläche und untereinander. Lunker stellen in diesem Bereich Schwachstellen dar und reduzieren die Haftzugfestigkeit. Die Aufnahmen in Abbildung 47 zeigen nur einen Ausschnitt der gesamten Kupferstruktur und können daher nicht repräsentativ angeführt werden. Zusätzlich ist, wie bereits erwähnt, nicht die gesamte Porosität der Schicht entscheidend (siehe zum Vergleich Abbildung 44).



*Abbildung 47: Auszug aus Schliffbildern unterschiedlicher Schicht-Porosität in Abhängigkeit von Prozessgeschwindigkeit und Pulverdruck*

Eine Übersicht der Schichtporosität in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit und des Pulverdrucks ist in Abbildung 48 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Porosität bei einem Pulverdruck von 1,2 bar über die Prozessgeschwindigkeit hinweg kaum unterscheidet. Erst bei einer Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit auf 100 mm/s ist ein Unterschied auszumachen. Allerdings nimmt die Standardabweichung mit zunehmender Beschichtungsgeschwindigkeit stetig zu. Ein ähnliches Verhalten ist bei einem Pulverdruck von 1,5 bar zu erkennen. Hier liegen die Messwerte, wie erwartet, deutlich über denen mit dem geringeren Pulverdruck, fallen jedoch auch mit zunehmender Prozessgeschwindigkeit bei gleichzeitig steigender Standardabweichung ab. Da bei einer Zunahme der Beschichtungsgeschwindigkeit eine Reduzierung des thermischen Energieeintrages einhergeht, ist in der Theorie von einer größeren Porosität infolge schlechterer Verschmelzung der einzelnen Kupferpartikel auszugehen. Wie bereits erwähnt beziehen sich die Messwerte nur auf eine partielle Porositätsbestimmung der Kupferstruktur und sind nicht für eine allgemein-

gültige Aussage über die Gesamtporosität der generierten Schicht heranzuziehen. Hierfür muss ein schnelleres alternatives Messverfahren herangezogen werden, da eine Bestimmung mit Hilfe von Schliffpräparationen und nachfolgenden Vermessungen am Laserscanmikroskop sowohl sehr zeit- als auch aufwandsintensiv sind. Möglicherweise bieten sich in diesem Zusammenhang magnetische Streufeldmessungen an, um einen Rückschlüsse auf die Gesamtporosität der Kupferstrukturen treffen zu können. In weiterführenden grundlagenorientierten Untersuchungen sollte diese Möglichkeit näher betrachtet werden.

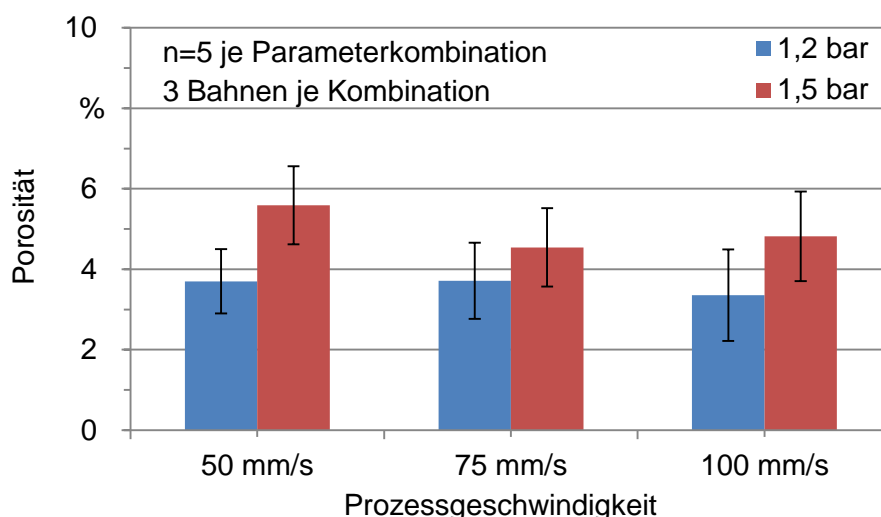


Abbildung 48: Porositätsmessung in Abhängigkeit variierender Prozessgeschwindigkeiten und Pulverdrücken

Da sich die Stromtragfähigkeit über den spezifischen Widerstand der Kupferstruktur berechnet, ist bei einer höheren Porosität bei konstanter Schichtdicke von einer geringeren Leitfähigkeit auszugehen. Daher wird im Folgenden die Stromtragfähigkeit der einzelnen Versuchsmuster anhand der Testvorgaben aus Kapitel 2.4.3 bestimmt und diese direkt mit den Werten aus Abbildung 48 verknüpft betrachtet.

### Bestimmung der Stromtragfähigkeit

Abbildung 49 gibt einen Überblick über alle vorliegenden Messergebnisse bezüglich Schichtdicke, Porosität und Stromtragfähigkeit. Hierbei ist zu erkennen, dass die bereits genannte Kombination aus Schichtdicke und Porosität entscheidend für die Stromtragfähigkeit ist. Folglich führen hohe Schichtdicken mit einer hohen Porosität zu ähnlichen Ergebnissen wie geringe Schichtdicken mit einer geringen Porosität. Des Weiteren ist ein direkt proportionales Verhalten der Schichtdicke und der Stromtragfähigkeit auszumachen. Eine eindeutige Korrelation der Porosität mit den anderen Ergebnissen ist nicht möglich. Vor allem bei der große Unterschied der Porosität bei einer Geschwindigkeit von 50 mm/s bei ähnlichen Werten hinsichtlich Schichtdicke und Stromtragfähigkeit legt die vorherige Vermutung nahe, dass die partielle Porositätsbestimmung nicht allgemeingültig für die Gesamtporosität der Schicht verwendet werden kann.

Übergreifend über alle Untersuchungen, bezogen auf eine Kupferbeschichtung von thermoplastischen Kunststoffen, sind deutlich die Abhängigkeiten der Prozessparameter untereinander und der Einfluss dieser auf die Haftzugfestigkeit, die Schichtdicke, die Porosität und die Stromtragfähigkeit dargestellt worden. Wie bereits zu Beginn angedeutet ist die Kombination der Prozessparameter in Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzgebietes, des Substratmaterials und der gewünschten Anforderungen zu wählen. Folglich können die angeführten Versuchsergebnisse jederzeit auf spezifische Anforderungen übertragen werden. Die Untersuchungen bilden somit nicht ein finales Ergebnis ab, sondern stellen eher einen Leitfaden für die strukturierte Kupferbeschichtung thermoplastischer Kunststoffsubstrate mit dem CAPM-Verfahren dar.

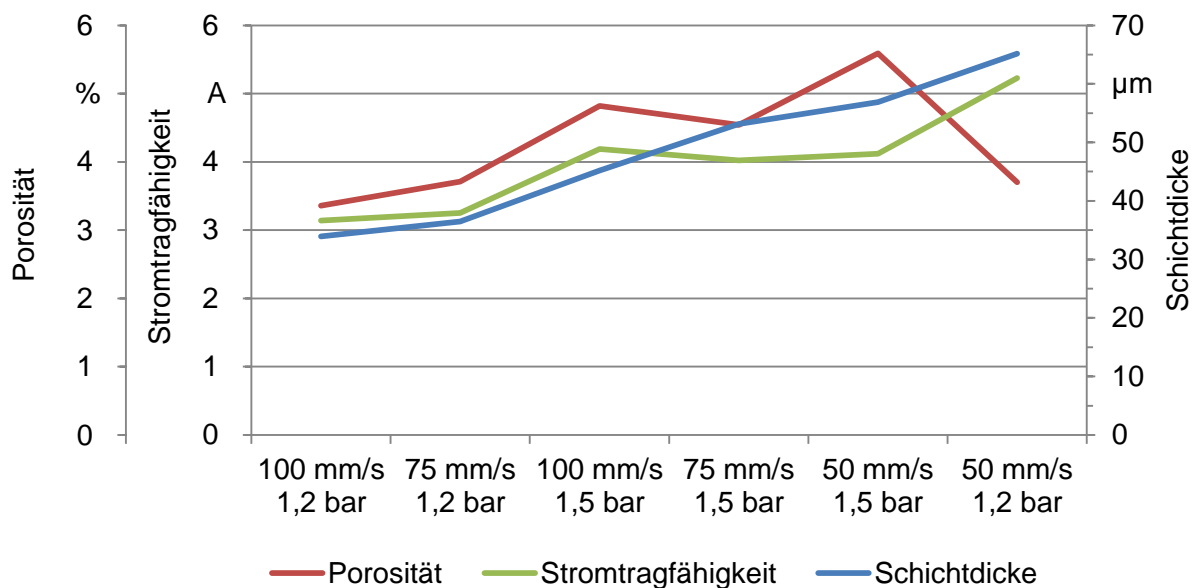


Abbildung 49: Zusammenhang zwischen Stromtragfähigkeit, Porosität und Schichtdicke in Abhängigkeit von Prozessgeschwindigkeit und Pulverdruck

In den nächsten drei Kapiteln wird exemplarisch am Beispiel zweier Faserverbundkunststoffe, einer technischen Keramik und eines Siliziumhalbleiters der Transfer dieser grundlegenden Erkenntnisse auf andere Substratmaterialien aufgezeigt.

## 4.2 Faserverbundwerkstoffe

Die Leichtbauweise gehört heutzutage zu den Megatrends in vielen Sektoren und ist mit einem kontinuierlichen Wachstum der Anwendungsgebiete verbunden. In der Automobilindustrie sind seit geraumer Zeit Leichtbaukonzepte zu beobachten. Geringeres Gewicht bedeutet weniger Emission von Treibhausgasen, weniger Verbrauch und Senkung des Trägheitsmoments des Gesamtfahrzeugs, was zudem eine Zunahme des dynamischen Verhaltens zur Folge hat. Ein noch größeres Interesse wird dem Leichtbau in der Luft- und Raumfahrt gewidmet. Wird der Anteil des Flugverkehrs aktuell auf 8% des gesamten Erdölverbrauchs geschätzt, ist bis 2020 mit einer Steigerung von 600% zu rechnen. [105] Folglich ist das ständige Bestreben der Luftfahrt nach Gewichtseinsparungspotentialen nicht verwunderlich, da hiermit direkt

Treibstoffkosten und Emissionen reduziert werden können. Ein Einsatz der CAPM-Technologie ist für viele Anwendungen der Automobil- und der Luftfahrtindustrie in Kombination mit leichten widerstandsfähigen Faserverbundwerkstoffen äußerst interessant. Eine partielle Substitution der standardmäßig eingesetzten Kabelbäume durch direkte Abscheidung leitfähiger Strukturen auf die Innenverkleidung kann eine enorme Gewichtseinsparung realisieren und folglich die Betriebskosten senken. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Aspekt wäre die Einsparung von Arbeitszeit bereits im Fertigungsprozess von Flugzeugen. Aktuell werden Kabelbäume mühsam in Handarbeit auf Nagelbretter vorkonfektioniert, um sie später in der Modulmontage an Laschen und Abstandshaltern einzurasten. Der Einsatz von CAPM würde diese Arbeitsschritte substituieren. Des Weiteren können durch eine vollautomatisierte Fertigung der Durchsatz erhöht und gleichzeitig Personalkosten eingespart werden.

In diesem Kapitel werden herkömmliche Faserverbundwerkstoffe aus dem Bereich der Luftfahrt und dem Automobilbau für die Untersuchungen herangezogen. Als übergeordnetes Ziel bzw. als zentrale Herausforderung wird die Generierung einer leitfähigen Kupferstruktur mit einer ausreichenden Haftzugfestigkeit angesehen.

Ein Faserverbundkunststoff (FVK) setzt sich allgemein aus zwei wesentlichen Bestandteilen zusammen, der Faser und der Matrix. Da vor allem die Fasern auftretende Zug- und Druckbelastungen aufnehmen, werden sie auch als Verstärkungsstoffe bezeichnet. Ihre Struktur und Anordnung bestimmen im Wesentlichen die mechanischen Eigenschaften des Verbunds. Der Matrix kommt die Aufgabe zu, dem Bauteil seine Form zu geben, die Fasern zu stützen und angreifende Kräfte einzuleiten sowie diese an möglichst viele Fasern zu übertragen. Grundsätzlich können Verstärkungsstoffe jede beliebige Form (flächig, faser- oder teilchenförmig) annehmen. Für technische Anwendungen besitzen allerdings Fasern aufgrund ihrer zugfestigkeitssteigernden Wirkung die größte Bedeutung. Bei den technisch hergestellten FVKs werden hauptsächlich Glas-, Aramid- sowie Kohlenstofffasern eingesetzt, welche jeweils spezifische Vor- und Nachteile bieten. Weiterhin wird durch die Wahl der Faserlänge zwischen Kurz-, Lang- und Endlosfasern unterschieden. Werden die Fasern unidirektional, d.h. in eine Richtung verlaufend, in der Matrix angeordnet, verhält sich der Verbundwerkstoff unter Beanspruchung anisotrop. In Faserrichtung können wesentlich höhere Belastungen als quer zur Faserrichtung ertragen werden. In der Regel werden die Verstärkungsfasern deshalb nicht einzeln in die Matrix eingebracht, sondern als Faserlagen gestaltet. [106]

Zu den bedeutendsten textiltechnisch aufbereiteten Formen gehören Gewebe und Gelege. Unter Geweben versteht man Flächengebilde aus Fasern, die nach dem Prinzip Kette und Schuss im rechten Winkel überkreuz liegen. Gelege bestehen aus einer oder mehreren Lagen von parallel angeordneten, nicht gewebten Fasern, d. h. aus textilen Bändern, die an Kreuzungspunkten fixiert werden. Ebenso werden Matten, die aus regellos verlaufenden, beliebig orientierten Fasern bestehen, vor allem bei der Herstellung von Glasfaserverbundkunststoffen, eingesetzt. Die Bin-

Art der Verstärkungsfasergewebe beeinflusst die Oberflächentopographie der Faserlage, insbesondere die Welligkeit. Körperbindungen ergeben grundsätzlich eine gleichmäßigere Oberfläche als Leinwandbindungen, Atlasgewebe gelten als besonders glatt (siehe Abbildung 50). [106; 107]

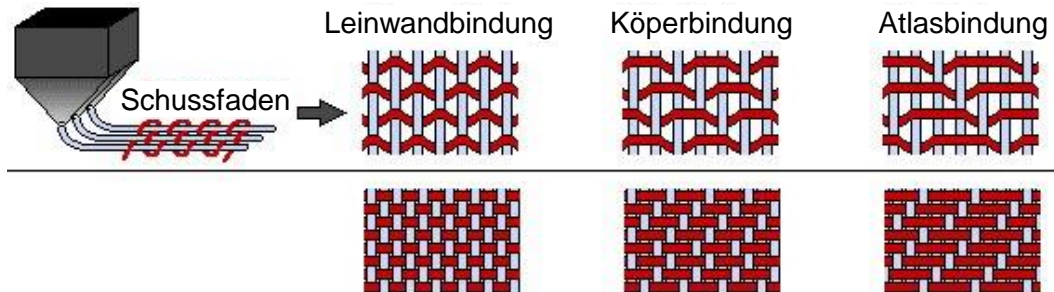


Abbildung 50: Grundbindungsarten von Fasergeweben [108]

Die Matrix bildet das Trägermedium, in dem sich die Fasern befinden. Hierbei ist meist eine gute Anbindung der Faser zur Matrix von hoher Bedeutung. Unterschieden wird in der Kunststofftechnik zwischen thermoplastischen und duroplastischen Matrixmaterialien. Thermoplaste sind im Vergleich zu Duroplasten einfacher zu verarbeiten, Duroplaste besitzen hingegen eine geringere Dichte und sind kostengünstiger. Am häufigsten kommt das duroplastische Reaktionsharz Epoxid zum Einsatz. Reaktionsharze liegen normalerweise in flüssiger Form vor. Durch Zugabe von Härtern wird die Vernetzungsreaktion der Molekülketten gestartet. Unter den Reaktionsharzen ist Epoxid vergleichsweise teuer und schwieriger zu verarbeiten als beispielsweise Ungesättigte Polyesterharze (UP), da es eine höhere Viskosität aufweist und die Härtingsreaktion langsamer abläuft. Allerdings weist Epoxidharz hervorragende statische und dynamische Eigenschaften auf und eignet sich deshalb vor allem im Verbund mit ebenso hochwertigen Fasern, wie Glas- und Kohlenstofffasern. [106]

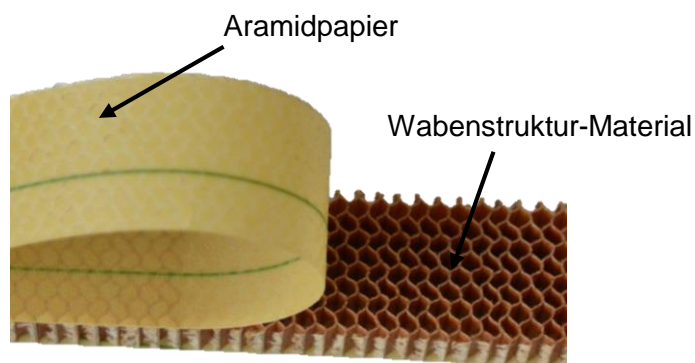


Abbildung 51: Aramid-Nomex®-Matrixstruktur (rechts)

Die vorliegenden FVKs der Luftfahrt basieren auf einer Bienenwabenstruktur aus Polyamidpapier, welche beidseitig von einem Aramid Nomex®-Papier in Leinwandbindung umschlossen ist (siehe Abbildung 51). Der ganze Verbund wird in Phenolharz getränkt und anschließend unter Druck und Temperatur ausgehärtet, um die technischen sowie mechanischen Eigenschaften des Segments zu erhöhen. Die



Proben aus dem Automobilbereich basieren auf einem Epoxidharz-Kohlefaser-Verbundwerkstoff. Die Prepregs des vorliegenden Faserverbundwerkstoffs, d. h. die vorimprägnierten, in Harz getränkten Faserschichten, bestehen aus unidirektionalem Gewebe. Dies bedeutet, dass die Schussfäden dünner sind und ihre Aufgabe hauptsächlich darin besteht, die Kettfäden zu sichern. Als Bindungsart ist eine Körperbindung bei der Herstellung verwendet worden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der CAPM auf den beiden genannten Faserverbundwerkstoffen separiert dargestellt, da eine Vergleichbarkeit aufgrund der unterschiedlichen Einsatzgebiete nicht relevant ist. Beginnend mit Glasfaserverbundwerkstoffen (GFK) der Luftfahrt folgen Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK) der Automobiltechnik.

#### 4.2.1 Generierung von Kupferstrukturen auf GFK-Substraten

Im Gegensatz zu den geringen Oberflächenrauheiten bei den vorangegangenen Untersuchungen auf Basis thermoplastischer Kunststoffkörper weisen die vorliegenden GFK-Proben eine enorme Rauheit auf. In Abbildung 52 sind exemplarisch zwei Substrate dargestellt, an welchen deutlich die Ursachen der hohen Rauheit zu erkennen sind. Die löchrige Oberfläche kann eindeutig auf den Herstellungsprozess zurückgeführt werden. Die Verbundpartner werden in Harz getränkt und sind nicht in diesem eingebettet, was beim Aushärten zu einer ausgeprägten Bildung von Gräben führen kann, da diese nicht durch zusätzliches Harzmaterial aufgefüllt werden können. Zusätzlich weist das Aramidpapier durch seine Leinwandbindung bereits eine hohe Rauheit auf, die sich im Messergebnis widerspiegelt.

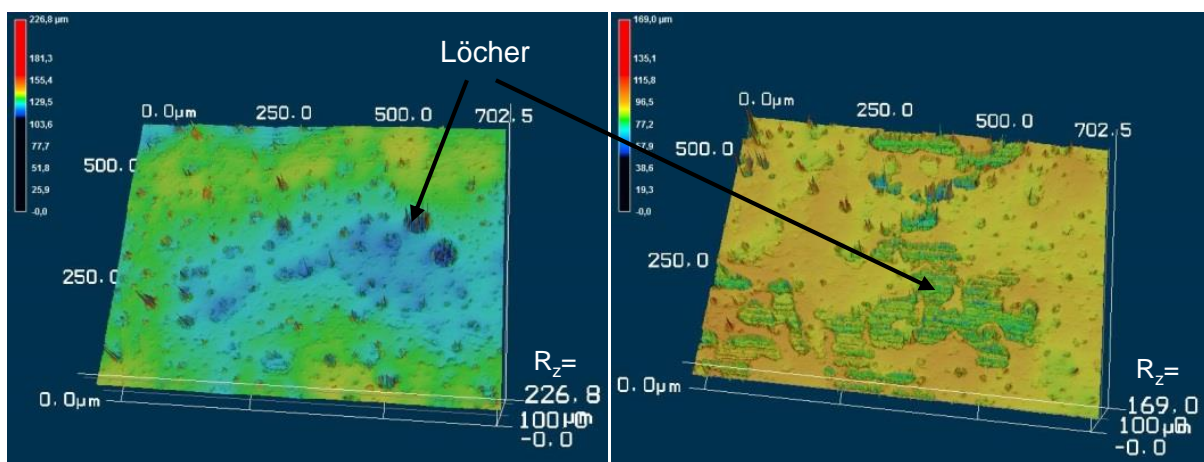


Abbildung 52: Oberflächenrauheit der verwendeten GFK-Substrate [57]

Aus Kapitel 2.2.3 ist ersichtlich, dass eine raue Oberfläche die Poren- und Mikrorissbildung fördert. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in der Realität eine Vorbehandlung der Oberflächen vor dem nächsten Fertigungsschritt vorgesehen ist, werden für die weiteren Untersuchungen Proben mit vorbehandelten Oberflächen verwendet. Hierbei werden meist zähflüssige Spachtelmassen auf Polyesterbasis auf die GFK-Substrate aufgebracht und ausgehärtet. Im vorliegenden Fall werden zwei herkömmliche Oberflächenbehandlungen, eine mineralische Feinspachtelmasse (A)

und eine ungesättigte Polyesterspachtelmasse (B) betrachtet, die sich in ihrer Füllstoff-Zusammensetzung und somit dem Einfluss auf die Oberflächenrauheit unterscheiden (siehe Abbildung 53). Die ursprüngliche Rauheit kann durch die Vorbehandlung auf fast ein Drittel reduziert werden, was die Poren- und Rissbildung reduziert und eine gleichmäßige Schichtabscheidung ermöglicht.

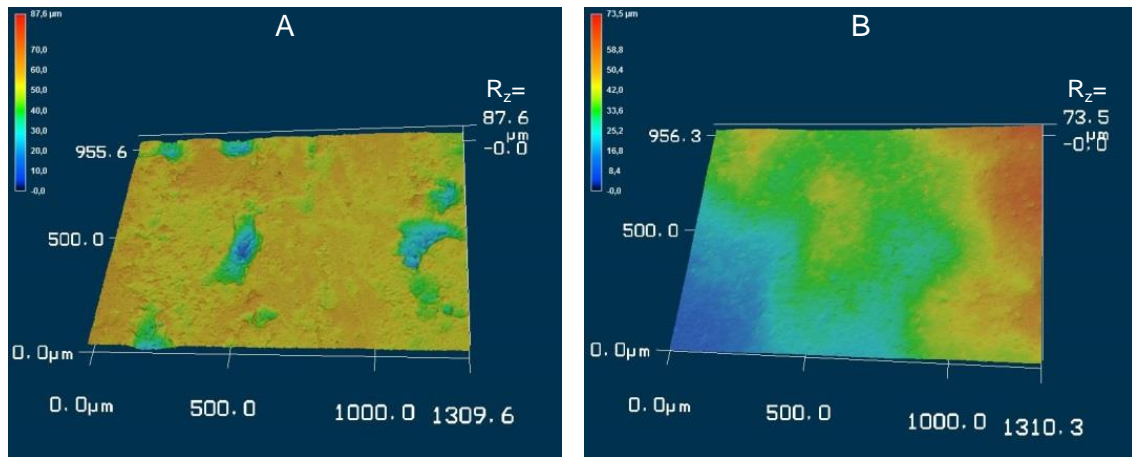


Abbildung 53: Oberflächenrauheit infolge unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlungen A und B [57]

Auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 4.1 werden die in Tabelle 5 gelisteten Prozessparameter für die CAPM verwendet. Eine Variation der Parameter wird nur bei der Prozessgeschwindigkeit vorgenommen. Hintergrund hierfür ist die vorgegebene Verarbeitungstemperatur der GFK-Substrate von maximal 140 °C, um den Materialverbund aus Aramidpapier und Wabenstruktur nicht zu beschädigen. Gleichzeitig soll eine maximal mögliche Schichtabscheidung realisiert werden, um ausreichend elektrische Leistung übertragen zu können.

Tabelle 5: Prozessparameter für die Kupferbeschichtung der GFK-Substrate

Prozessparameter	Wert
Gasflussrate in l/min	45
Pulverdruck in bar	1,5
Abstand Substrat zur Düse in mm	10
Anzahl an Bahnen	1
Geschwindigkeit in mm/s	25 - 100

Aus Kapitel 4.1 geht hervor, dass eine Reduzierung der Oberflächentemperatur durch Änderung unterschiedlicher Parameter erreicht werden kann. Die Prozessgeschwindigkeit stellt hierbei den Parameter mit der größten Wirkung dar. Zusätzlich sind durch eine Änderung keine negativen Effekte hinsichtlich der Schichtausprägung, wie in Abbildung 38 oder Abbildung 41 dargestellt, zu erwarten. Die Ergebnisse in Abbildung 54 zeigen die gleiche Tendenz wie nach den Ergebnissen aus Kapitel 4.1 erwartet. Bei geringerer Prozessgeschwindigkeit wird eine höhere



Schichtdicke aufgebracht, was aber mit einer erhöhten thermischen Belastung der Substratoberfläche verbunden ist. Eine erhöhte Geschwindigkeit bedingt sowohl ein Absinken der Schichtdicke als auch der Prozesstemperatur. Ein gravierender Einfluss infolge der unterschiedlichen Oberflächenvorbehandlungen ist nicht zu detektieren. Die Prozesstemperatur zeigt einen quasi linear abfallenden Verlauf bei steigender Prozessgeschwindigkeit, wobei die Standardabweichung stetig größer wird, was bei konstanter Messfrequenz des Laserpyrometers auf eine Reduzierung der Messwerte zurückzuführen ist und somit mit einem ungenaueren Messergebnis einhergeht. Bei den Messwerten der Schichtdicke ist eher eine abfallende Exponentialkurve zu detektieren, welche im Variationsbereich von 75 mm/s auf 100 mm/s keine weitere Reduzierung der Schichtdicke bedingt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen aus Kapitel 4.1. Folglich ist zu vermuten, dass für die Beschichtung der vorliegenden GFK-Substrate bei steigender Prozessgeschwindigkeit und einer Beschichtungsüberfahrt eine Annäherung der Schichtdicke an einen Wert von ungefähr 15  $\mu\text{m}$  erfolgt.

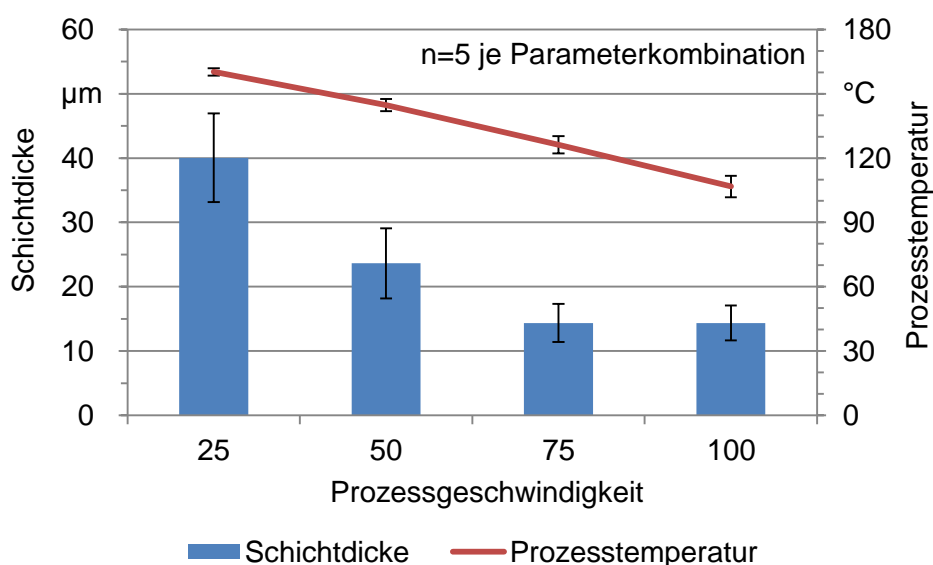


Abbildung 54: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Prozessgeschwindigkeit verknüpft mit der Prozesstemperatur

Des Weiteren ist festzustellen, dass die Standardabweichung der Schichtdicke mit ansteigender Prozessgeschwindigkeit stetig abnimmt, was einem entgegengesetzten Verlauf zu den Ergebnissen aus Kapitel 4.1 entspricht. Begründet liegt dieser Effekt in der hohen thermischen Belastung während des Beschichtungsprozesses in Kombination mit der rauen Substratoberfläche der GFK-Probekörper. Die erhöhte Prozesstemperatur führt zwar einerseits zu einer großen Schichtdicke, andererseits aber auch zu zahlreichen Delaminationen der generierten Kupferstrukturen infolge der übermäßigen thermischen Belastung (siehe Abbildung 55). Die raue Oberfläche begünstigt zwar eine Anhaftung der Kupferpartikel, erschwert jedoch die Ausbildung einer gleichmäßigen Schichtdicke (siehe Abbildung 56). Zusammenfassend ist für eine CAPM der vorliegenden GFK-Substrate hinsichtlich thermischer Maximalbelas-

tung und ausreichender Schichtdicke eine Prozessgeschwindigkeit im Bereich von 75 mm/s - 100 mm/s zu empfehlen. Eine weitere Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit erscheint hinsichtlich weiterer Reduzierung der Beschichtungstemperatur und vermutlichen Annäherung der Schichtdicke an einen festen Wert zwar sinnvoll, ist aber in Bezug auf die Schichtporosität nicht anzuraten. Diese wird mit zunehmender Prozessgeschwindigkeit aufgrund des reduzierten thermischen Energieeintrags zwangsläufig zunehmen, was schließlich eine Erhöhung des elektrischen Widerstandes und somit eine Reduzierung der Stromtragfähigkeit zur Folge hat. Im Folgenden wird näher auf die Porosität eingegangen, um die genannten Thesen zu stützen.

Vorher werden die generierten Kupferschichten einem Cross-Cut-Test nach DIN EN ISO 2409 [109] unterzogen, um schnell und einfach eine qualitative Aussage über die Haftzugfestigkeit zu erhalten. Exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 55 dargestellt. Vor allem bei den GFK-Substraten mit einer erhöhten Schichtdicke der Kupfer-Metallisierung konnte keine ausreichende Haftzugfestigkeit festgestellt werden. Allerdings ist die Durchführung des Testverfahrens in Verbindung mit den GFK-Substraten nicht einfach darstellbar. Der manuelle Prozess zur Herstellung des Gitterschnittes kann bei übermäßigem Krafteintrag sehr schnell die obere Aramidpapier-Decklage beschädigen, was einen Bruch des Papiers zur Folge hat. Der Bruch bedingt wiederum eine Delamination der Kupferschicht, da die darunterliegende spröde Aramidstruktur ausbricht.

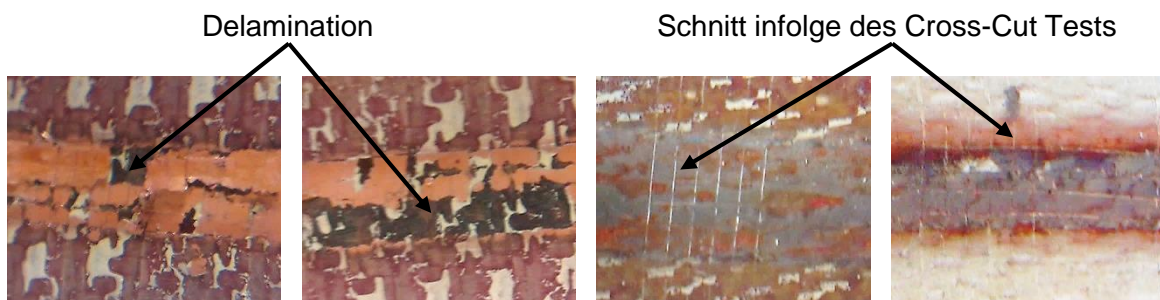


Abbildung 55: Exemplarische Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen

Die Verwendung eines alternativen Testverfahrens, wie zum Beispiel dem im Kapitel 4.1 erwähnten Stirnabzugstest, würde diese Problematik umgehen und zudem quantitative Messwerte liefern. Eine Verwendung ist im vorliegenden Fall aber nicht möglich, da die Kupferstrukturen eine zu große Rauheit aufweisen, um eine saubere Verbindung aus Stempel und Kupferschicht gewährleisten zu können. In Abbildung 56 sind exemplarisch Ausschnitte aus generierten Kupferstrukturen dargestellt. Die raue Oberfläche lässt eine Haftzugfestigkeitsbestimmung mit herkömmlichen klebstoffbasierten Verfahren, wie beispielsweise dem Stirnabzugstest, nicht zu. Hierbei würde der verwendete Klebstoff zur Fixierung des Zugstempels in die Strukturen einlaufen und somit den Messwert verfälschen. Zusätzlich ist eine senkrechte Positionierung kaum möglich.

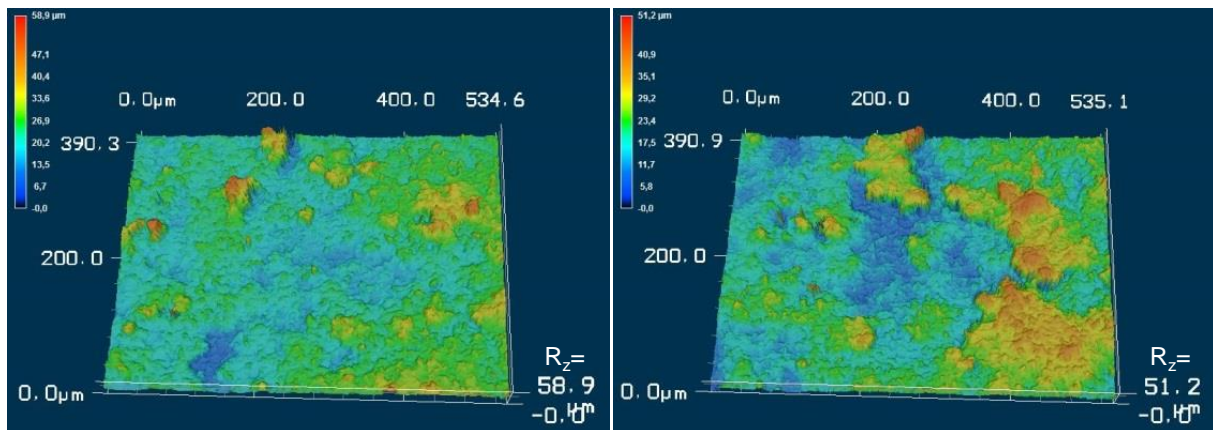


Abbildung 56: Oberflächenrauheit generierter Kupferstrukturen auf vorbehandelten GFK-Substraten

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Porosität und Haftfestigkeit (siehe Kapitel 4.1) werden Schliffbilder ausgewählter Proben erstellt, um eine Erklärung für die schlechten Ergebnisse aus dem Cross-Cut-Test zu erreichen. Abbildung 57 zeigt, dass die Porosität, ähnlich den Erkenntnissen auf Basis thermoplastischer Kunststoffe, mit zunehmender Prozessgeschwindigkeit ebenfalls zunimmt. Dieses Ergebnis ist eindeutig auf die reduzierte Prozesstemperatur zurückzuführen, die als Hauptindiz für die höhere Porosität angeführt werden kann, was die Annahme aus den vorangehenden Untersuchungen eindeutig bestätigt.

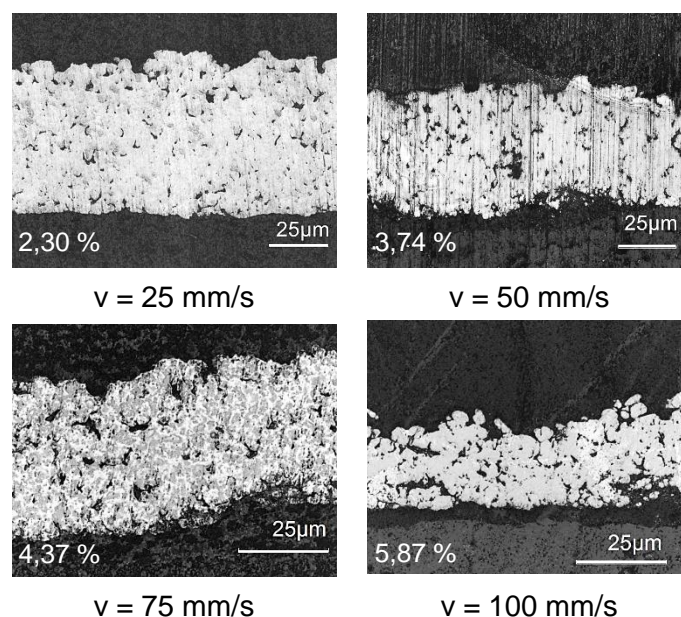


Abbildung 57: Ausschnitte aus Schliffbildern unterschiedlicher Schicht-Porosität in Abhängigkeit von der Prozessgeschwindigkeit

Auffallend ist allerdings die sehr geringe Körnung der generierten Strukturen im direkten Kontaktbereich zwischen Substratoberfläche und Kupferschicht. Zusätzlich ist die Verklammerung der Schichten mit der Oberfläche teilweise sehr ausgeprägt, was normalerweise auf eine gute Haftzugfestigkeit schließen lässt. Diese Erkenntnisse bestärken die Theorie der manuell induzierten mechanischen Beschädigung

des Substrats im Zuge des Cross-Cut-Tests. Aktuelle Testverfahren sind hierzu bedingt durch die hohe Rauheit nicht geeignet, was eine quantitative Bestimmung der Haftzugfestigkeit für die vorliegenden GFK-Substrate zum derzeitigen Zeitpunkt nicht möglich macht.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine Erzeugung leitfähiger Kupferstrukturen auf GFK-Substraten möglich ist. Es können hierbei sowohl die Schichtdicke als auch die Porosität durch Anpassung der entsprechenden Prozessparameter variiert werden, was die Einsatzmöglichkeiten der CAPM-Technologie zusätzlich erweitert. Zusätzlich sind die Annahmen aus Kapitel 4.1 durch die dargestellten Ergebnisse bestätigt worden. Für einen industriellen Einsatz im Bereich der Luftfahrt sind jedoch noch zahlreiche Herausforderungen zu lösen, allem voran die reproduzierbare quantitative Bestimmung der Haftzugfestigkeit der generierten Kupferstrukturen. Darüber hinaus müssen die optimalen Prozessparameter im Hinblick auf eine Vergrößerung der Schichtdicke durch eine Erhöhung der Bahnanzahl evaluiert werden.

#### 4.2.2 Generierung von Kupferstrukturen auf CFK-Substraten

Die verwendeten CFK-Proben zeigen eine deutlich geringere Oberflächenrauheit im Vergleich zu den GFK-Substraten. Anhand von Abbildung 58 sind exemplarisch zwei Oberflächenprofile mit entsprechenden Messwerten aufgezeigt. Die niedrigen Werte sind auf die Körperbindung der CFK-Prepregs zurückzuführen. Aufgrund der relativ glatten Oberfläche ist eine Vorbehandlung nicht erforderlich. Allerdings ist bei einer thermischen Beschichtung von CFK eine Grenztemperatur zu beachten, um eine mechanische Vorschädigung des Materials zu vermeiden. Diese ist hersteller- und materialabhängig und liegt für die vorliegenden CFK-Substrate bei 130 °C.

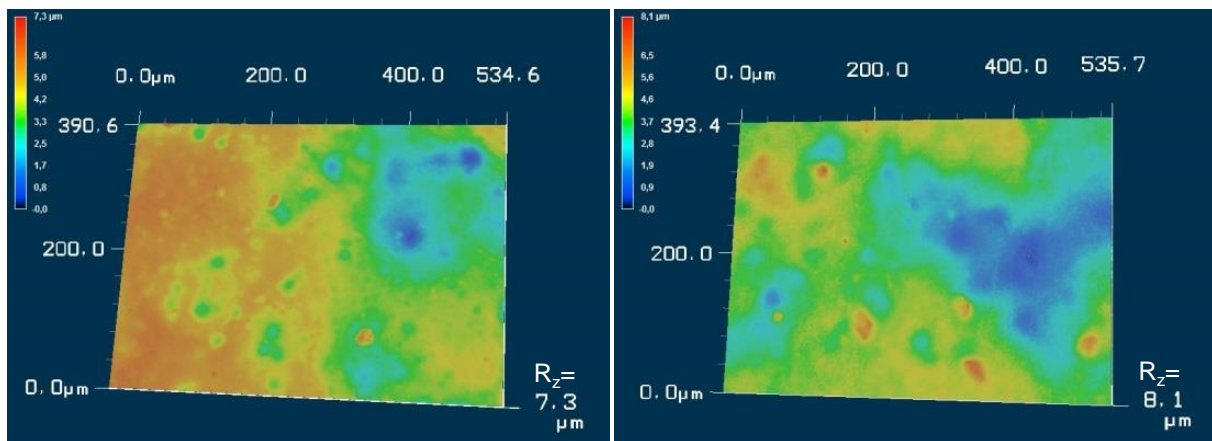


Abbildung 58: Oberflächenrauheit der verwendeten CFK-Substrate

Auf Basis der Erkenntnisse aus den GFK-Untersuchungen sind die Prozessparameter für die CAPM unter Berücksichtigung der limitierten Prozessstemperatur entsprechend angepasst worden und Tabelle 6 zu entnehmen. Die Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit und des Abstandes zwischen Düse und Substratoberfläche führen zu deutlich geringeren Prozessstemperaturen. Um eine ausreichende Schicht-

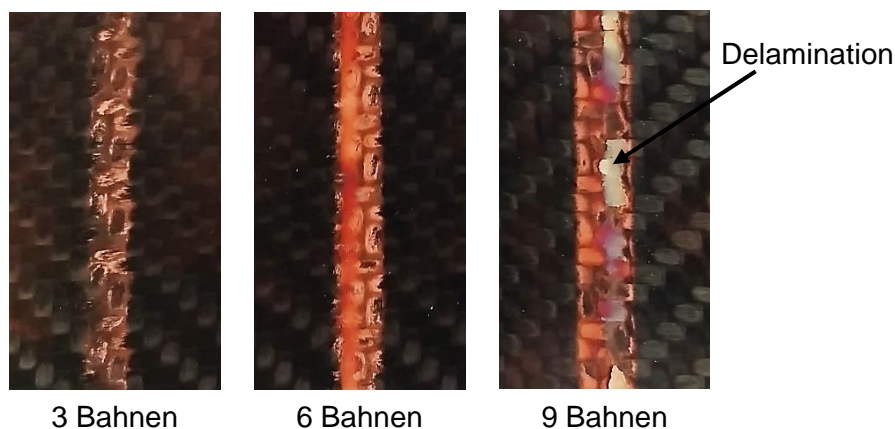


dicke infolge der Parameteränderung gewährleisten zu können, wird die Anzahl der Bahnen entsprechend erhöht.

*Tabelle 6: Prozessparameter für die Kupferbeschichtung der CFK-Substrate*

Prozessparameter	Wert
Gasflussrate in l/min	45
Pulverdruck in bar	1,5
Abstand Substrat zur Düse in mm	13
Anzahl an Bahnen	6
Geschwindigkeit in mm/s	90

Es ist zu beobachten, dass infolge der geringen Prozesstemperatur eine Herstellung zusammenhängender Kupferstrukturen schwierig darstellbar ist (siehe Abbildung 59). Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Bahnanzahl die Schichtqualität zunimmt, jedoch nach oben hin limitiert ist. Bei mehr als sechs Überfahrten sind eine zunehmende Oxidation und eine auftretende Delamination der Schicht zu beobachten. Die Oxidation ist auf einen Anstieg der Prozesstemperatur infolge der höheren Bahnanzahl zurückzuführen. Die Delamination liegt in der Zunahme der thermisch induzierten Spannungen begründet, welche ebenfalls bei jeder weiteren Beschichtungsbahn ansteigt.



*Abbildung 59: Beschichtete CFK-Proben in Abhängigkeit der Bahnanzahl*

Die schlechte Haftung der einzelnen Kupferpartikel kann eindeutig auf die geringe Prozesstemperatur zurückgeführt werden. Wie bereits in Kapitel 2.2.3 dargestellt, ist eine mechanische Verklammerung zwischen Kupferpartikel und Substratoberfläche von entscheidender Bedeutung für eine gute Vernetzung. Die geringe Beschichtungstemperatur ermöglicht kein partielles Anschmelzen der Substratoberfläche, was einen Formschluss unterbindet (siehe Abbildung 60). Folglich basiert die Haftung im vorliegenden Fall hauptsächlich auf chemischen Bindungen, unter anderem den sogenannten Van-der-Waals-Kräften, welche wesentlich schwächer sind. In Verbindung mit der induzierten thermischen Spannung, welche durch den Temperaturgra-

dienten aus Probe (Raumtemperatur) und Plasma-Pulver-Gemisch (ca. 130 °C) entsteht, ist eine Verbesserung der Haftung nicht möglich.

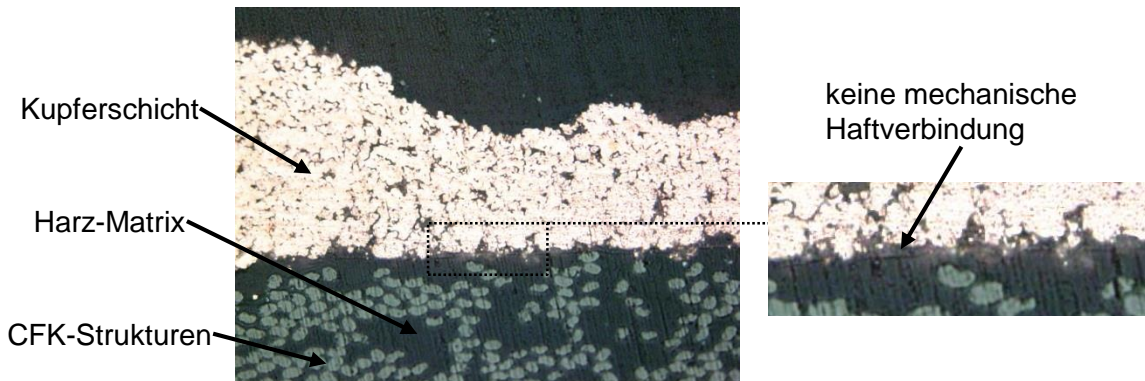


Abbildung 60: Schliffbild einer beschichteten CFK-Probe

Im nächsten Schritt erfolgt ein Vorwärmen der CFK-Substrate, um den Temperaturgradienten zu reduzieren und somit eine Verbesserung der Haftung zu erreichen. Die Verminderung des Temperaturgradienten zwischen Substratoberfläche und Substrat erhöht die thermische Energie, die zur Verschmelzung der einzelnen Kupferpartikel zur Verfügung steht, da weniger Energie an das kalte Substrat abgegeben wird. Folglich kann eine zusammenhängende Beschichtung realisiert werden.

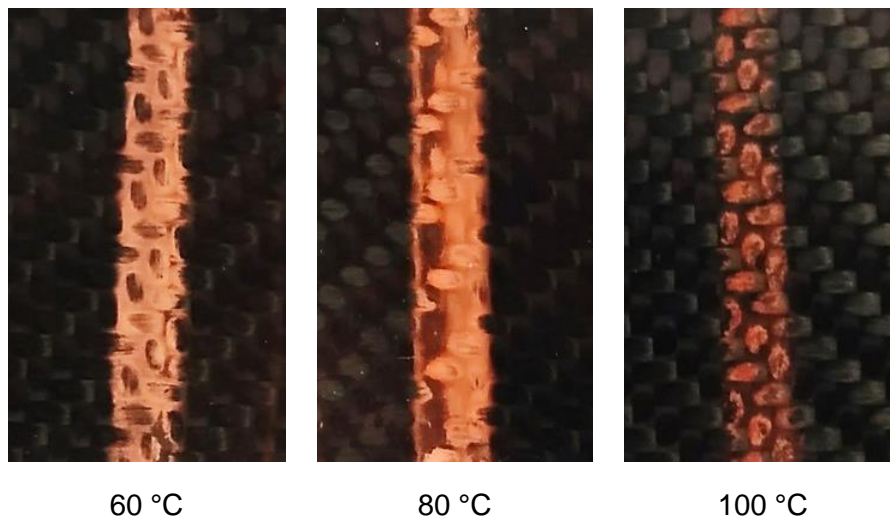


Abbildung 61: CFK-Proben in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur

Das Vorwärmen zeigt keinen merklichen Einfluss auf die Haftung, was deutlich in Abbildung 61 und bei einem direkten Vergleich mit Abbildung 60 zu erkennen ist. Somit ist der Effekt der verminderten Haftung auch durch eine Vorwärmung nicht zu verbessern. Möglicherweise ist die niedrige Beschichtungstemperatur für die schlechte Haftung verantwortlich, da infolge dessen kein partielles Anschmelzen der Polymermatrix realisiert werden kann und somit keine mechanische Verklammerung der Kupferpartikel mit der Substratoberfläche erfolgt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Beschichtung der vorliegenden handelsüblichen CFK-Substrate mit dem CAPM-Verfahren nicht anforderungsgerecht umgesetzt werden kann.

### 4.3 Technische Keramik

Die technische Keramik unterscheidet sich aufgrund ihres optimierten Eigenschaftsprofils von der herkömmlichen Keramik, wie sie beispielsweise für Geschirr oder Fliesen eingesetzt wird. Hierbei spielen vor allem Hitzebeständigkeit, Dielektrizitätskonstante, Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und geringe thermische Ausdehnung eine entscheidende Rolle. Diese Keramiken finden in elektronischen Baugruppen Anwendung, bei denen hohe Anforderungen hinsichtlich der genannten Eigenschaften bestehen, wie in der Medizintechnik oder der Leistungselektronik. Technische Keramiken lassen sich in zwei Werkstoffgruppen einteilen, die Oxid-Keramiken und die Nichtoxid-Keramiken.

Oxid-Keramiken sind im Wesentlichen Werkstoffe, die aus einphasigen Metalloxiden bestehen, welche nahezu ausschließlich auf synthetischen Rohstoffen basieren. Das Gefüge zeichnet sich durch eine geringe Korngröße sowie durch wenige bis keine Glasphasen aus. Ein besonderes Merkmal ist ihre sehr hohe Schmelztemperatur  $T_s$ , die für  $Al_2O_3$  2050 °C und Zirkonoxid 2690 °C beträgt. In der Leistungselektronik kommen Oxid-Keramiken insbesondere aufgrund ihrer guten Korrosionsbeständigkeit, Bruchzähigkeit sowie Verschleiß- und Temperaturfestigkeit zum Einsatz. [110]

In den folgenden Untersuchungen werden planare  $Al_2O_3$ -Probekörper der Abmessungen 65 mm x 35 mm x 0,65 mm verwendet. Diese weisen ein gutes Preis-Leistungsverhältnis auf und eignen sich hervorragend für die angestrebten Grundlagenuntersuchungen. Ausgewählte Eigenschaften sind Tabelle 7 zu entnehmen.

*Tabelle 7: Ausgewählte spezifische Eigenschaften der vorliegenden  $Al_2O_3$ -Substrate*

$Al_2O_3$ -Gehalt in Gew.-%	> 96
Schmelzpunkt in °C	1950
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	3,72
CTE linear in ppm/K	8,2
Wärmeleitfähigkeit in W/mK	24,7

Vor allem die Wärmeleitfähigkeit und der geringe Wärmeausdehnungskoeffizient stellen positive Aspekte im Zuge einer Kupferbeschichtung mit dem CAPM-Verfahren dar. Hierdurch können höhere Prozesstemperaturen gefahren werden, was sich förderlich auf die Schichteigenschaften (Haftzugfestigkeit, Dicke, Porosität) auswirken kann. Die höhere thermische Belastbarkeit im Vergleich zu Thermoplasten oder FVK spiegelt sich in den verwendeten Prozessparametern wider. Es werden die Standardeinstellungen für Gas- und Pulverdruck aus den vorangegangenen Untersuchungen beibehalten, aber unterschiedliche Werte für den Abstand, die Anzahl der Bahnen und die Prozessgeschwindigkeit evaluiert (siehe Tabelle 8). Zusätzlich eignen sich die keramischen Substrate sehr gut für ein Vorwärmen mit Hilfe des Heiztisches. Hierdurch werden thermische Spannungen in der Metallschicht infolge des hohen Temperaturgradienten unterbunden. Dies wiederum hat einen deutlichen Ein-

fluss auf das Beschichtungsergebnis, vor allem die Schichtdicke und Porosität. Folglich wird ausschließlich mit Vorwärmen gearbeitet.

*Tabelle 8: Prozessparameter für die Kupferbeschichtung der  $Al_2O_3$ -Substrate*

Prozessparameter	Wert
Gasflussrate in l/min	45
Pulverdruck in bar	1,5
Abstand Substrat zur Düse in mm	10 - 14
Anzahl an Bahnen	1 - 5
Geschwindigkeit in mm/s	50 - 150
Vorwärmen in °C	200 - 300
Prozessgasmischung in l/min	$N_2$ (38), $N_2H_2$ (7)

Einen weiteren Unterschied im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen stellt die Verwendung eines Prozessgasgemisches aus  $N_2$  und Formiergas (95%  $N_2$ , 5%  $H_2$ ) dar. Dieses wird der CAPM-Anlage über zwei Gasvolumenstromdurchflussregler im Verhältnis 38 l/min zu 7 l/min zugeführt. Der reine Wasserstoff hat eine reduzierende Wirkung, wodurch eine Bindung des Sauerstoffs in der Beschichtungszone erfolgt. Dies reduziert die Oxidation der generierten Kupferstrukturen. Gleichzeitig findet durch die Verbrennung von Wasserstoff eine exotherme Reaktion statt, welche die Prozesstemperatur merklich erhöht. Beides wirkt sich positiv auf die Qualität der generierten Kupferstrukturen aus.

#### 4.3.1 Einfluss der Vorwärmtemperatur auf die Schichtdicke

Die Bestimmung der Schichtdicke erfolgt nach dem aufwändigen Vorgehen wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, wodurch nur ein Probenumfang von  $n=1$  pro Parameterkombination angefertigt wird. Auf die wissenschaftliche Aussagekraft hat dies jedoch keinen Einfluss, da die Abhängigkeit der Schichtdicke von der Prozessgeschwindigkeit, dem Abstand zwischen Plasmadüse und Substratoberfläche und der Prozesstemperatur in allen vorangegangenen Untersuchungen eindeutig bestätigt wurde. In Abbildung 62 ist ein Überblick über die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen bei einem konstanten Vorwärmen der Substrate von 200 °C angeführt. Anhand der vorliegenden Ergebnisse können zahlreiche Erkenntnisse über die Möglichkeiten der CAPM von keramischen Substraten abgeleitet werden. Es ist eine kontinuierliche Zunahme der Schichtdicke bei zunehmender Bahnanzahl zu erkennen. Der Abstand zwischen Plasmadüse und Substratoberfläche wirkt sich ebenfalls deutlich aus. Hier ist bei einer Erhöhung eine deutliche Reduzierung der Schichtdicke zu beobachten. Beide Ergebnisse bestätigen die Erwartungen. Allerdings ist bei wiederholten Überfahrten mit einem stärkeren Schichtwachstum gerechnet worden. Die Verminderung der Schichtdicke bei einer Zunahme des Abstandes ist direkt mit einer flächigen Ausbreitung der Schicht infolge des kegelförmigen Plasmastrahles verbunden. Zusätzlich nimmt die thermische und kinetische Energie des Pulver-Gas-Gemisches



aufgrund der größeren Weglänge ab, was zusätzlich das Schichtwachstum vermindert.

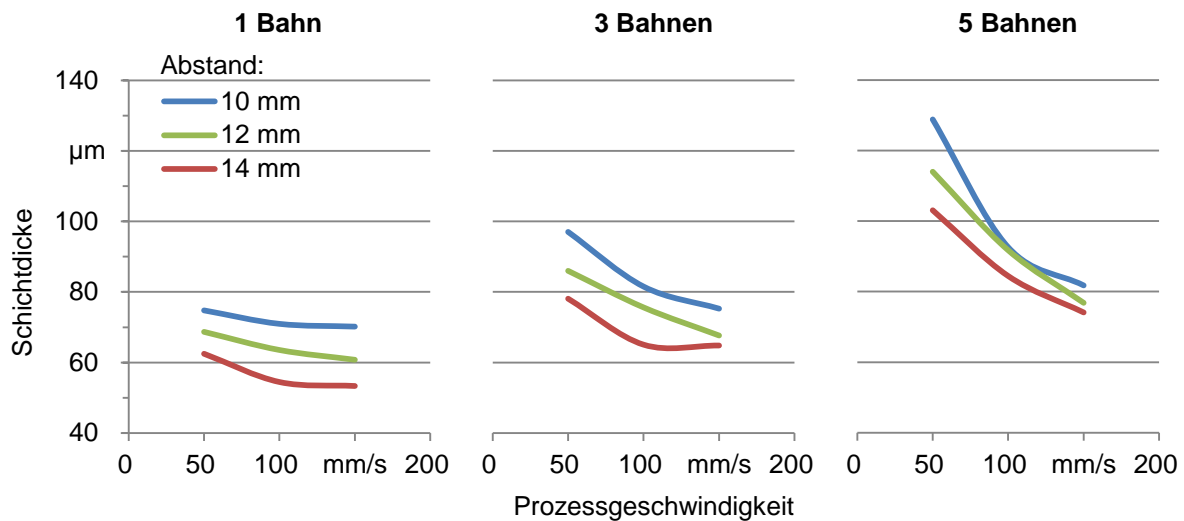


Abbildung 62: Einfluss von Prozessgeschwindigkeit, Abstand und Bahnanzahl auf die Schichtdicke bei einem konstanten Vorwärmen von 200 °C

Der Einfluss der Prozessgeschwindigkeit ist stark an die Anzahl an Überfahrten geknüpft. Bei einer Bahn ist der Abfall der Schichtdicke mit zunehmender Geschwindigkeit im Verhältnis zur gesamten Dicke relativ gering. Bei drei und fünf Bahnen hingegen ist dieser Effekt wesentlich größer. Eine mögliche Erklärung kann auf die thermische Energie und deren Einfluss auf das Schichtwachstum in Verbindung mit der Haftung der Kupferpartikel untereinander zurückzuführen sein. Bei 50 mm/s wird das Schichtwachstum infolge der langsamen Prozessgeschwindigkeit und dem damit verbundenen hohen Energieeintrag durch das Plasma-Pulver-Gemisch begünstigt. Die Erhöhung der Geschwindigkeit hat eine drastische Reduzierung des Energietransfers zur Folge, was sich bei zunehmender Anzahl der Bahnen deutlich widerspiegelt. Gleichzeitig nimmt die Oxidation der Kupferpartikel an der Umgebung mit zunehmender Prozessdauer zu. Die entstehenden Oxidschichten reduzieren die Haftung der Kupferpartikel untereinander, was durch die niedrigere Prozesstemperatur zusätzlich begünstigt wird. Eine Erhöhung der Vorwärmtemperatur mindert den angesprochenen Effekt. Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigen die Ergebnisse der Beschichtung bei einer Vorwärmtemperatur von 250 °C bzw. 300 °C. Im Vergleich mit Abbildung 62 ist zu erkennen, dass der Abfall der Schichtdicke infolge der Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit und der Anzahl der Bahnen geringer ausfällt. Folglich wird die thermische Energie, welche durch das Plasma-Pulver-Gemisch transferiert wird und aufgrund der höheren Prozessgeschwindigkeit einen geringeren Wert aufweist, durch die höhere Grundtemperatur des Substrates teilweise ausgeglichen. Gleichzeitig bedingt eine höhere Grundtemperatur eine beschleunigte Oxidation der Kupferpartikel, was die Haftung dieser untereinander bei wiederholten Überfahrten erschwert. In Summe ist der Effekt der erhöhten Vorwärmtemperatur entscheidender als die beschleunigte Oxidation, was in Abbildung 63 und Abbildung 64 deutlich zu

erkennen ist. Eine Abhängigkeit des Abfalls der Schichtdicke infolge der Abstandserhöhung ist nicht zu erkennen. Hier sind sowohl für 250 °C, als auch für 300 °C vergleichbare Abweichungen festzustellen.

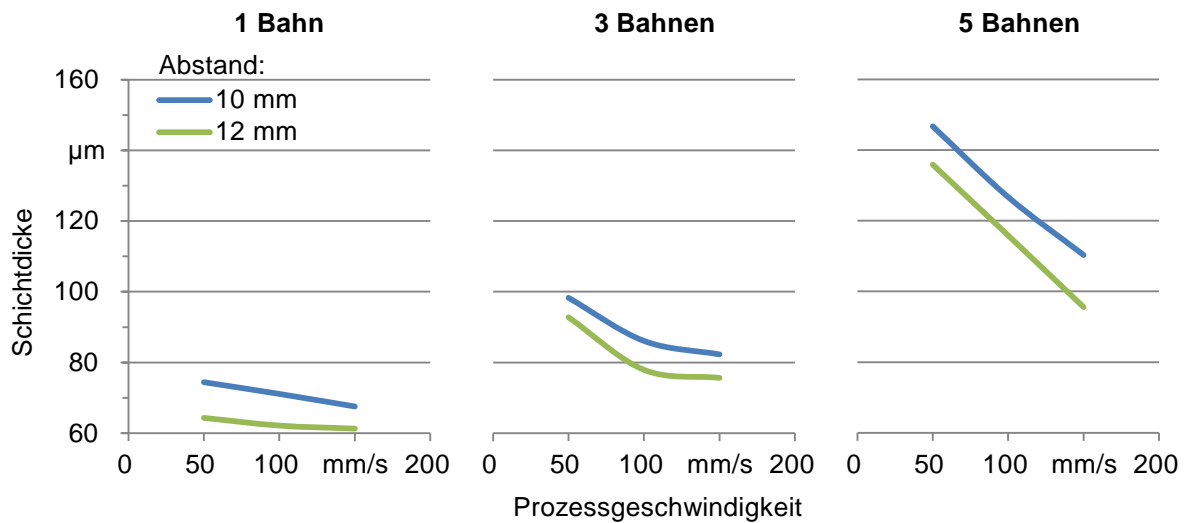


Abbildung 63: Einfluss von Prozessgeschwindigkeit, Abstand und Bahnanzahl auf die Schichtdicke bei einem konstanten Vorwärmen von 250 °C

Den Abbildung 62, Abbildung 63 und Abbildung 64 ist zudem zu entnehmen, dass die Schichtdicke der ersten Kupferbahn sehr ähnlich ausfällt. Hierdurch kann gefolgert werden, dass die Schichtdicke bei einer Bahn durch Erhöhen der Vorwärmtemperatur nicht gesteigert werden kann. Hier wären in einem nächsten Schritt die Erhöhung des Pulverdrucks oder die Reduzierung der Prozessgeschwindigkeit naheliegende Prozessparameter, um einen eindeutigen Effekt zu erzielen.

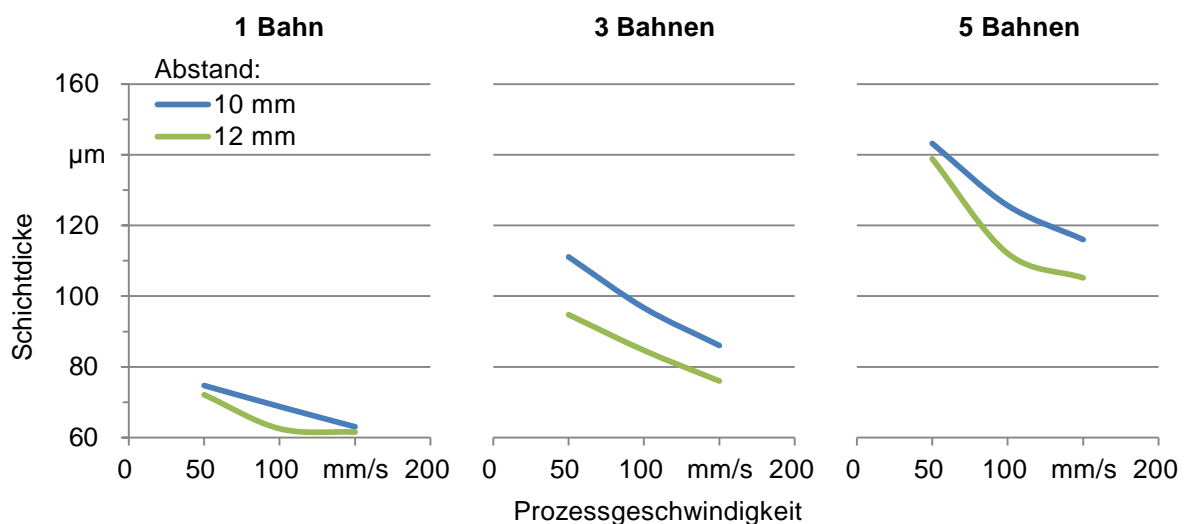


Abbildung 64: Einfluss von Prozessgeschwindigkeit, Abstand und Bahnanzahl auf die Schichtdicke bei einem konstanten Vorwärmen von 300 °C

Bei einer Prozessierung mit mehreren Bahnen ist hingegen eine Steigerung der Schichtdicke zu erkennen, was die vorangegangenen Thesen in Bezug auf die Haf-

tungsverbesserung infolge der höheren thermischen Energie bekräftigt. Aber auch hier ist eine Sättigung zu erkennen, die sich beim Vergleich der Proben mit fünf Bahnen in Abbildung 63 und Abbildung 64 einstellt. Folglich ist die optimale Vorwärmtemperatur bei einer Kupferbeschichtung der vorliegenden Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrate mit dem CAPM-Verfahren zwischen 250 °C und 300 °C zu wählen.

#### 4.3.2 Einfluss der Vorwärmtemperatur auf die Porosität

Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 4.1 wird die Porosität einer CAPM-Kupferschicht erheblich durch die Prozessstemperatur beeinflusst. In den nachfolgenden Untersuchungen wird auf Basis der Prozessparametervariation der vorangegangenen Versuche der Zusammenhang zwischen Porosität, Prozessgeschwindigkeit, Abstand und Vorwärmtemperatur analysiert.

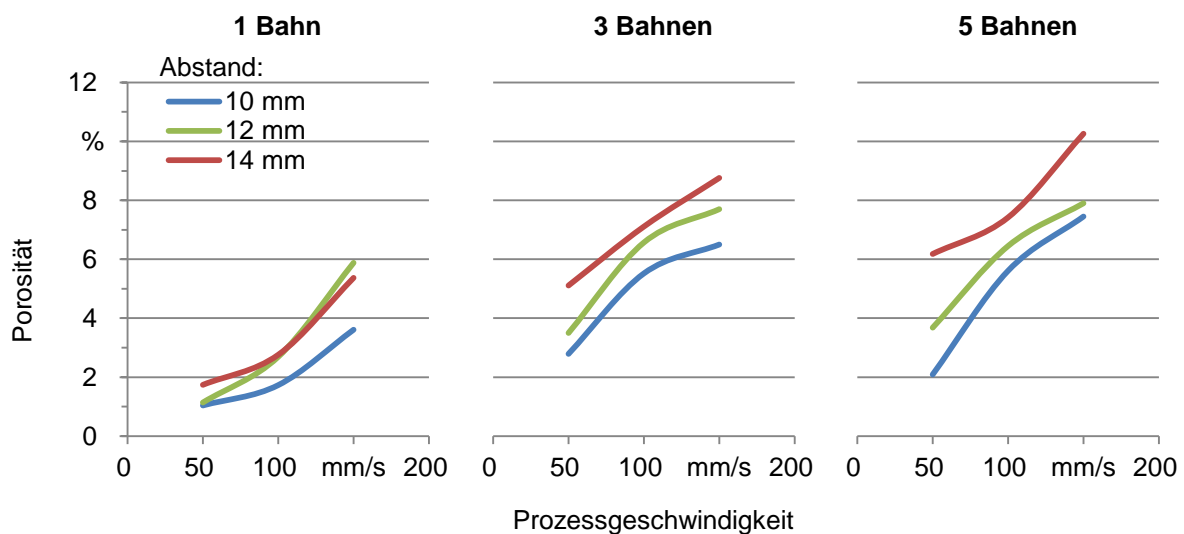


Abbildung 65: Einfluss von Prozessgeschwindigkeit, Abstand und Bahnanzahl auf die Porosität bei einem konstanten Vorwärmen von 200 °C

In Abbildung 65 sind die Ergebnisse der Porosität der jeweiligen Schichten bei einer konstanten Vorwärmtemperatur der Keramiksubstrate von 200 °C angegeben. Wie erwartet, nimmt die Porosität bei wachsendem Abstand zwischen Substratoberfläche und Plasmadüse zu. Der gleiche Effekt ist bei zunehmender Prozessgeschwindigkeit zu beobachten. Bei steigender Bahnanzahl führt die größere Schichtdicke verbunden mit dem additiven Metallisierungsprozess zu einer zunehmenden Lunkerbildung, was eine erhöhte Porosität bedingt. Werden sowohl Abstand als auch Bahnanzahl erhöht summieren sich die jeweiligen Einzeleinflüsse zu einer deutlich erhöhten Porosität. Der Einfluss der Prozessgeschwindigkeit ist hingegen differenziert zu betrachten. Bei einer einfachen Beschichtung sind infolge der Geschwindigkeitserhöhung nur marginale Effekte bei den Abständen 12 mm und 14 mm auszumachen. Im Vergleich dazu ist bei drei- bzw. fünffacher Beschichtung von einem proportionalen Verhältnis zwischen Geschwindigkeitssteigerung und Porositätsanstieg auszugehen. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass der Einfluss der Prozessgeschwindigkeit mit zunehmender Bahnanzahl deutlich ansteigt.

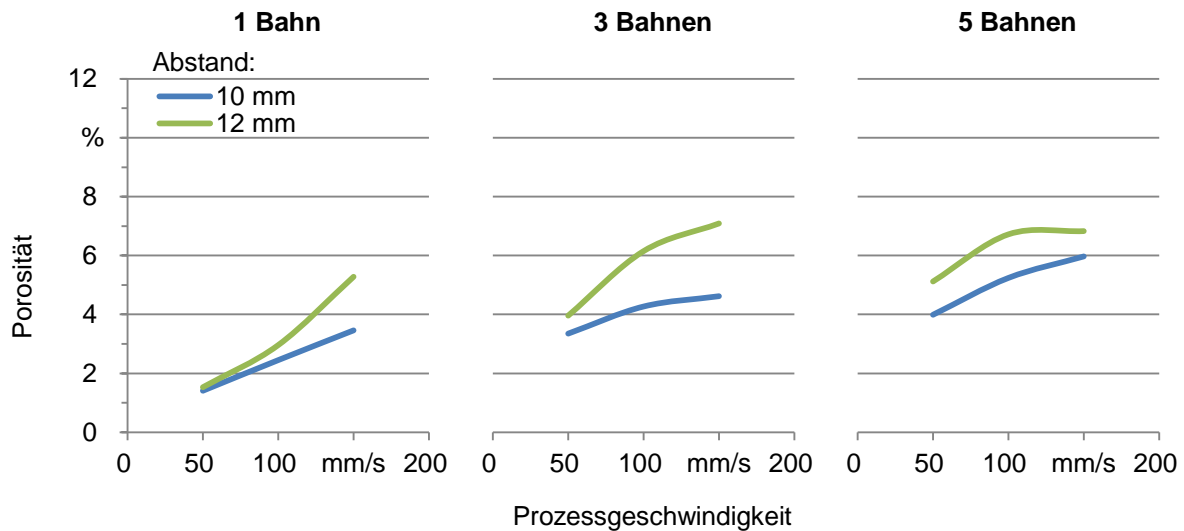


Abbildung 66: Einfluss von Prozessgeschwindigkeit, Abstand und Bahnanzahl auf die Porosität bei einem konstanten Vorwärmen von 250 °C

Die Erkenntnisse aus Abbildung 65 können teilweise auf Abbildung 66 und Abbildung 67 übertragen werden. Auch hier ist infolge einer Vergrößerung des Abstandes oder einer Erhöhung der Bahnanzahl eine steigende Porosität zu erkennen. Gleiches gilt für die Prozessgeschwindigkeit, welche ebenfalls ein annähernd proportionales Verhältnis zur Porosität aufweist.

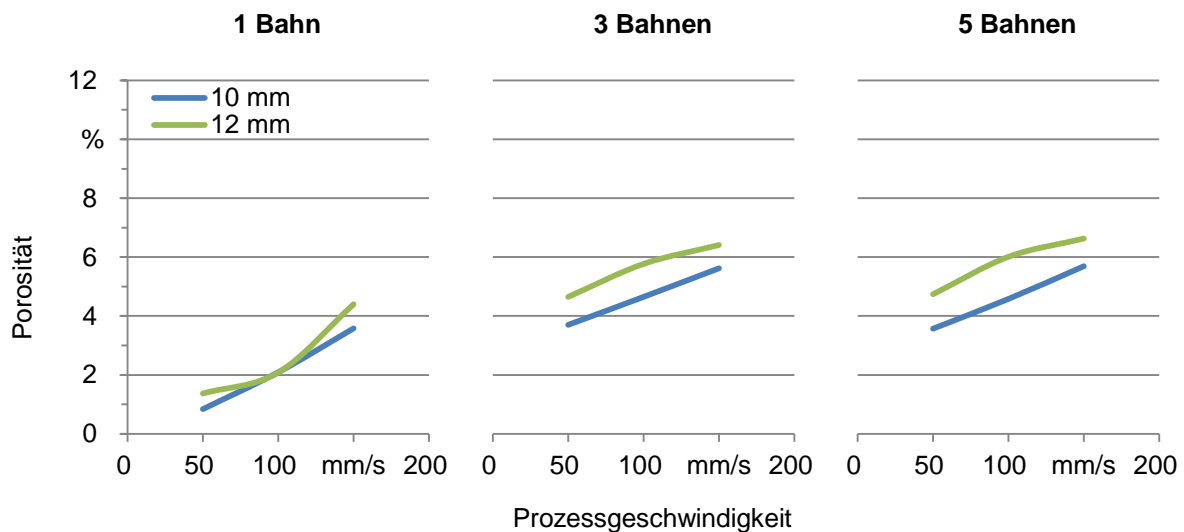
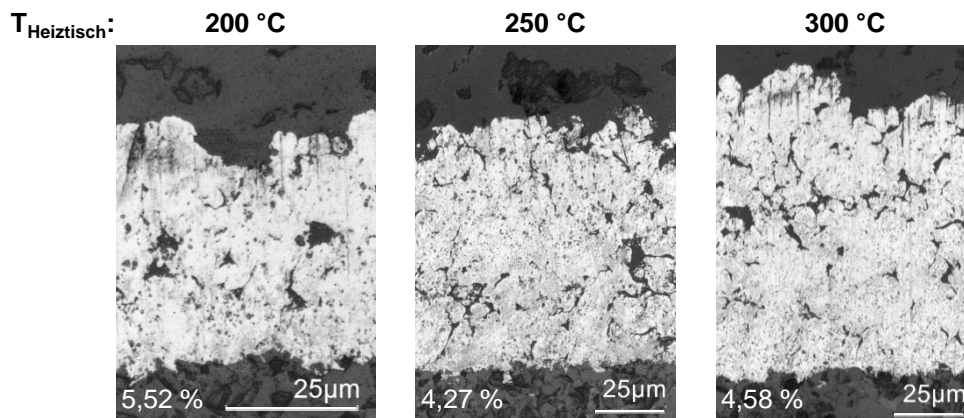


Abbildung 67: Einfluss von Prozessgeschwindigkeit, Abstand und Bahnanzahl auf die Porosität bei einem konstanten Vorwärmen von 300 °C

Auffallend sind hingegen die geringeren maximalen Porositätswerte im Vergleich zu Abbildung 65. Vor allem bei einer erhöhten Bahnanzahl ist eine deutlich geringere Porosität zu detektieren. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse in Abbildung 67 nur einen marginalen Unterschied zwischen der Porosität bei 3 und 5 Bahnen. Die Reduzierung der Temperaturdifferenz zwischen Plasma-Pulver-Gemisch und der vorgewärmten Substratoberfläche begünstigt das Verschmelzen der einzelnen Kupfer-

partikel. Somit ist nachgewiesen, dass eine Erhöhung der Vorwärmtemperatur die Porosität reduzieren kann.

In Abbildung 68 sind Schliffbilder ausgewählter Probekörper angeführt. Alle Keramiksubstrate sind mit drei Überfahrten prozessiert worden und unterscheiden sich nur in der Vorheiztemperatur. Hierbei ist deutlich der Zusammenhang zwischen der Vorheiztemperatur, der Schichtdicke und der Porosität zu erkennen. Die Probe mit der geringsten Vorheiztemperatur weist die höchste Porosität bei niedrigster Schichtdicke auf. Im Gegensatz dazu zeigt die Probe mit der höchsten Vorheiztemperatur die größte Schichtdicke, aber nicht die geringste Porosität, was wiederum auf die erhöhte Schichtdicke zurückgeführt werden kann. Ein Einfluss der Vorheiztemperatur bis 250 °C ist deutlich zu erkennen. Folglich ist eine Vorheizung im Bereich zwischen 250 °C und 300 °C zu wählen, um ein optimiertes Ergebnis aus Schichtdicke und Porosität gewährleisten zu können.



*Abbildung 68: Ausgewählte Schliffbilder zur exemplarischen Darstellung des Zusammenhanges zwischen Vorwärmtemperatur, Schichtdicke und Porosität*

Zusammenfassend lässt sich für die CAPM der vorliegenden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substratkörper festhalten, dass ein Vorwärmen einen deutlichen Einfluss sowohl auf die Schichtdicke als auch auf die Porosität der generierten Kupferstrukturen hat. Folglich sind abhängig von den unterschiedlichen Anforderungen der Leistungselektronik verschiedene Eigenschaften der generierten Kupferstrukturen darstellbar. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen somit deutlich das Potential der CAPM-Technologie auf, da neben einer geringen Porosität auch Schichtdicken weit über 100 µm darstellbar sind.

#### 4.4 Siliziumhalbleiter

Aktuell werden in der klassischen Waferprozessierung kupfermetallische Deckschichten in nasschemisch galvanischen Prozessen aufgebracht. Hierbei werden die gedünnten Wafer (70 - 200 µm) temporär auf eine Trägerfolie aufgebracht, um ein sicheres Handling der Silizium-Wafer (Si-Wafer) während der nachfolgenden Prozessschritte zu ermöglichen. Nach dem Sputtern eines Seed-Layers sowie eines Fotolithografie-Schrittes wird in einem Galvanikprozess die Kupferschicht in der

benötigten Stärke abgeschieden. Anschließend werden durch Strippen des Fotoresists und durch Differenzätzen die gewünschten Zielstrukturen erreicht. Den Abschluss bilden die Vereinzelung der Leistungsbaulemente und das Lösen von der Trägerfolie. In der Praxis erschweren die notwendigen Anforderungen des Galvanikprozesses in Verbindung mit dem erschwerten Handling einen prozesssicheren und konstanten Kupferauftrag. Sowohl Sägeprozesse als auch falsche Prozessparameter der Galvanik können zu einem Brechen des Chips führen. Zudem erzeugen die eingebrachten thermomechanischen Spannungen eine deutliche Verwölbung der Halbleiter, wodurch eine sichere Weiterverarbeitung nicht möglich ist. Durch eine Erhöhung der Temperaturen im Galvanikprozess können diese Verwölbungen reduziert, jedoch nicht vollständig beseitigt werden. [111] Dies stellt neben der technologisch aufwändigen sowie zeit- und kostenintensiven Prozesskette das primäre Defizit der galvanischen kupferbasierten oberseitigen Leistungshalbleitermetallisierung dar.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass der Beschichtungsprozess von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst wird. Hierdurch können unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich Schichtdicke, Haftzugfestigkeit und Qualität der erzeugten Strukturen generiert werden. Die Untersuchungen in Kapitel 4.1 bis 4.3 haben gezeigt, dass der Abstand zwischen Düse und Substratoberfläche, die Prozessgeschwindigkeit und der Pulverdruck einige Schlüsselfaktoren des Prozesses darstellen.

In diesem Kapitel wird die Machbarkeit einer vollflächigen Kupferstruktur auf ungedünnsten Si-Wafern mit unterschiedlichen Endmetallisierungen (Al, Cu-Sputter-Schicht oder Ti/TiN) mit Hilfe des CAPM-Verfahrens untersucht. Entscheidende Kenngrößen sind in diesem Zusammenhang die Schichtdicke und die Porosität der erzeugten Strukturen, um die CAPM-Technologie für einen Einsatz in der Waferprozessierung etablieren zu können. In den folgenden Untersuchungen werden herkömmliche Si-Wafer verwendet, welche jeweils mit einer entsprechenden Endmetallisierung versehen sind. Aufgrund der hohen Materialkosten der Si-Wafer und aufgrund der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen wird die Probenanzahl der folgenden Untersuchungen auf  $n=1$  je Parameterkombination festgelegt. Nach dem Zuschnitt der Wafer auf die Probenabmessungen von 50 mm x 50 mm x 1 mm werden die Proben laut Prozessparameter in Tabelle 9 vollflächig prozessiert (siehe Abbildung 69). Hierbei werden die Prozessgeschwindigkeit, der Abstand zur Düse und der Bahnabstand variiert. Durch die beiden erstgenannten Parameter werden erste Erkenntnisse über den Einfluss der Prozesstemperatur des CAPM-Prozesses auf die Schichtqualität (Schichtdicke, Haftung, Oxidation) bei einer vollflächigen Beschichtung evaluiert. Unter Bahnabstand ist die Distanz zwischen zwei Metallisierungsbahnen zu verstehen. Umso kleiner dieser bemessen ist, desto größer ist die Überlagerung zwei parallel verlaufender Kupferstrukturen. Mit Hilfe dieses Parameters kann eine Glättung der Struktur erfolgen. Die einzelnen Kupferstrukturen, welche jeweils eine Gauß-ähnliche Glockenform aufweisen (siehe Abbildung

16), können durch optimiertes jeweiliges Überlagern eine gleichmäßige Schichtdicke über die gesamte Substratoberfläche hinweg ergeben.

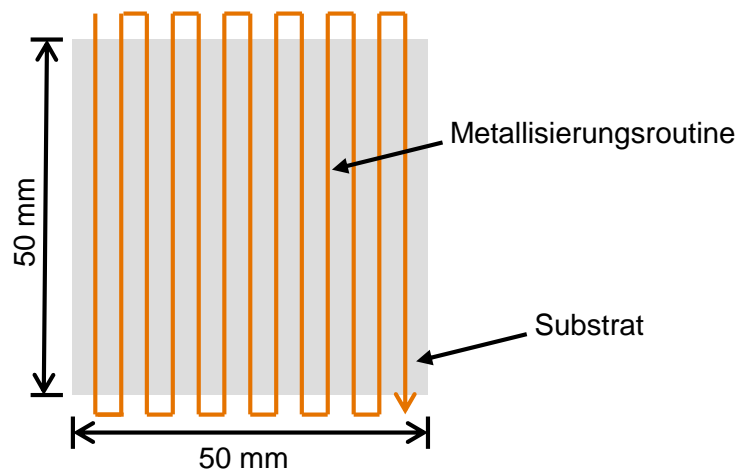


Abbildung 69: Schematische Darstellung des vollflächigen Metallisierungsablaufs der Si-Wafer Proben

Bei einer Reduzierung des Abstandes zwischen Düse und Substratoberfläche ist dieser Schritt umso wichtiger, da infolge dessen auch die Breite der erzeugten Strukturen aufgrund des kegelförmigen Plasmastrahles abnimmt. Gleichzeitig wird durch diese Variation die Rauheit der Schicht reduziert, welche neben der Schichtdicke relevante Faktoren für die weiteren Prozessschritte in der Leistungselektronik sind. [112] So stellen beispielsweise Bondprozesse spezifische Anforderungen an die Dicke und Rauheit einer Schicht. Alle Untersuchungen werden mit einem  $N_2$ -Plasma durchgeführt, um die thermische Belastung gering zu halten.

Tabelle 9: Prozessparameter für die vollflächige Kupferbeschichtung der Si-Wafer

Prozessparameter	Wert
Gasflussrate in l/min	45
Pulverdruck in bar	1,5
Anzahl an Bahnen	5
Abstand Substrat zur Düse in mm	8 - 10
Geschwindigkeit in mm/s	150 - 240
Bahnabstand in mm	0,6 - 1,5

#### 4.4.1 Einfluss der Prozessparametervariation

Aufgrund der hochspiegelnden Oberfläche der Si-Wafer ist eine Temperaturmessung während der Plasmabeschichtung mit Hilfe des Pyrometers nicht möglich. Folglich kann eine Bewertung der generierten Strukturen nicht auf die Prozesstemperatur bezogen durchgeführt werden. Die vollflächige Kupferbeschichtung der Wafer mit der genannten Titan/Titannitrid (Ti/TiN) Endmetallisierung konnte aufgrund von Delamination der abgeschiedenen Kupferstrukturen mit keiner der angegebenen



Parameterkombinationen realisiert werden. Die schlechte Haftung zwischen den einzelnen Kupferpartikeln und der Ti/TiN-Oberfläche kann auf mehrere Einflussfaktoren zurückgeführt werden. Die geringe Prozess Temperatur in Verbindung mit der hohen Prozessgeschwindigkeit führt zu einer geringen thermischen und kinetischen Belastung der Endmetallisierung. In Verbindung mit den spezifischen Materialeigenschaften von Ti und TiN (siehe Tabelle 10) ist keine bzw. nur eine geringe formschlüssige Verbindung zwischen Kupferpartikel und Endmetallisierung möglich. Sowohl die thermische als auch die kinetische Energie des Gas-Pulver-Gemisches sind zu gering, um ein Anschmelzen der Oberfläche zu erreichen oder ein Verbinden durch Aufprallen der Kupferpartikel in die harte Ti/TiN-Oberfläche zu ermöglichen. Neben den energetischen Aspekten sind die induzierten Spannungszustände ein weiterer negativer Einflussfaktor im Hinblick auf die Haftung. Ein Vorwärmen und ein kontrolliertes Abkühlen der Probekörper werden aus den Vorkenntnissen auch in diesem Zusammenhang für zukünftige Untersuchungen empfohlen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine partielle Verbindung der Partikel und der Ti/TiN-Oberfläche zu erkennen, aber über die komplette Fläche der vorliegenden Probekörper dauerhaft nicht zu realisieren ist.

*Tabelle 10: Ausgewählte spezifische Eigenschaften der Si-Wafer und der Endmetallisierungen [113; 114; 115; 116; 117; 118]*

Endmetallisierung	Aluminium	Kupfer	Titannitrid	Titan	Silizium
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	235	400	29	22	150
CTE linear [ppm/K]	23,1	16,5	9,4	8,6	2,6
Schmelzpunkt [°C]	660	1084	2950	1668	1410
Härte [Nmm <sup>2</sup> ]	167	369	2450	795	k. A.

Eine vollflächige Kupfermetallisierung der beiden Endmetallisierungen Cu und Al kann mit den in Tabelle 9 aufgeführten Prozessparametern durchgeführt werden. Die Variation der Prozessparameter Abstand zwischen Düse und Substrat, Bahnabstand und Prozessgeschwindigkeit zeigt hierbei einen deutlichen Einfluss auf die generierte Schichtdicke der Kupferstrukturen (siehe Abbildung 70). Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Schichtdicke bei einer ansteigenden Prozessgeschwindigkeit und gleichzeitiger Reduzierung des Bahnabstandes und des Abstandes zwischen Düse und Substrat konstant zunimmt. Die Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit bedingt eine Reduzierung der thermischen Energie, was sich in einer verminderten Schichtdicke widerspiegelt (siehe beispielsweise Abbildung 46). Dieser Effekt kann durch eine Verminderung des Abstandes zwischen Düse und Substrat reduziert bzw. ausgeglichen werden, wie in Kapitel 4.1. bereits nachgewiesen (siehe Abbildung 62). Eine gleichzeitige Reduzierung des Bahnabstandes kann in diesem Zusammenhang sogar ein konstantes Schichtwachstum herbeiführen, was auf die steigende Überlappungsfläche der einzelnen Kupferbahnen zurückzuführen ist. Ein Unterschied im Vergleich der beiden Endmetallisierungen ist nicht auszumachen.



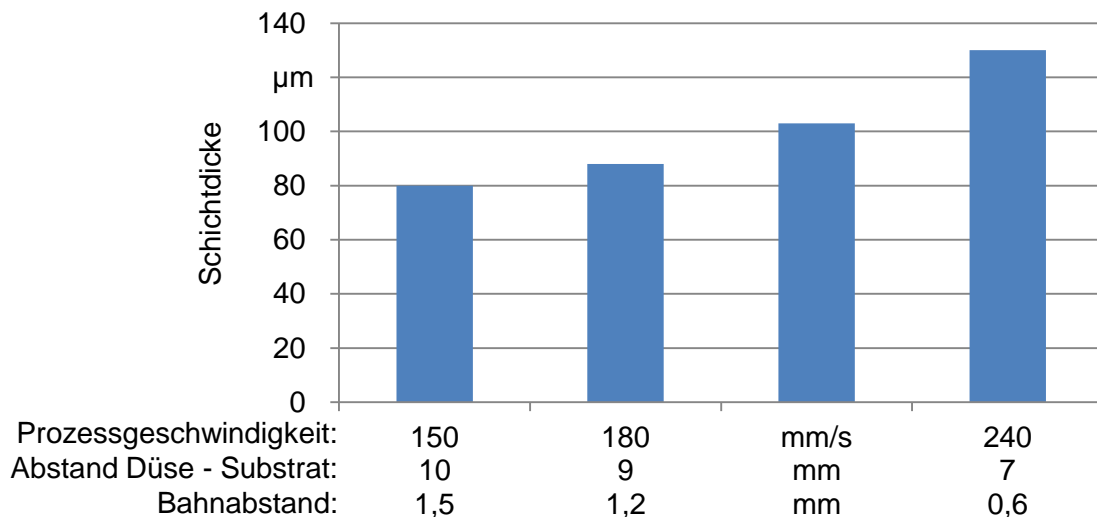


Abbildung 70: Einfluss der Prozessparametervariation auf die Schichtdicke

Wie zu Beginn dieses Kapitels angedeutet, führt die zunehmende Überschneidung der Kupferbahnen zu einer Verminderung der Oberflächenrauheit  $R_z$  der erzeugten Kupferflächen, wie in Abbildung 71 deutlich zu erkennen ist.

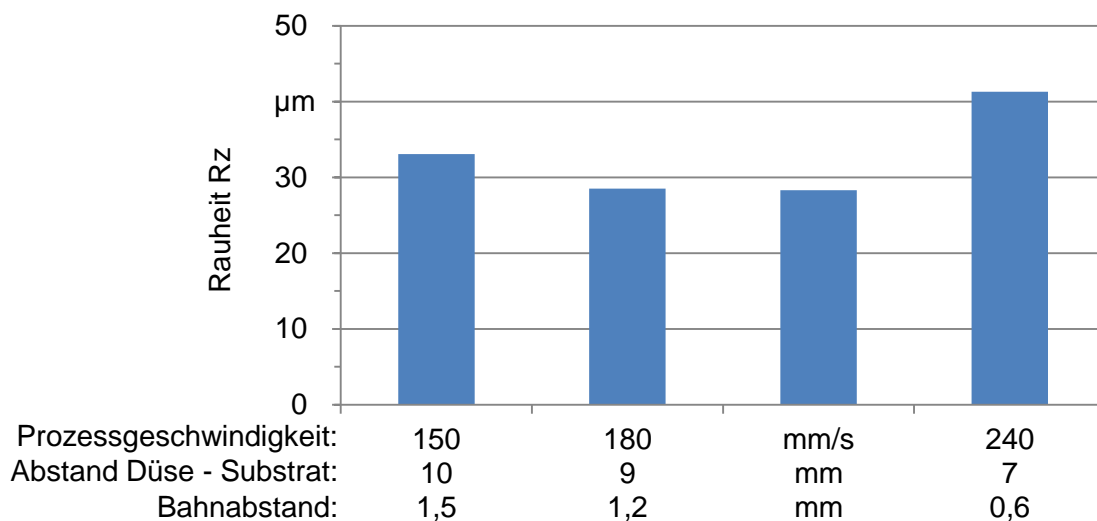
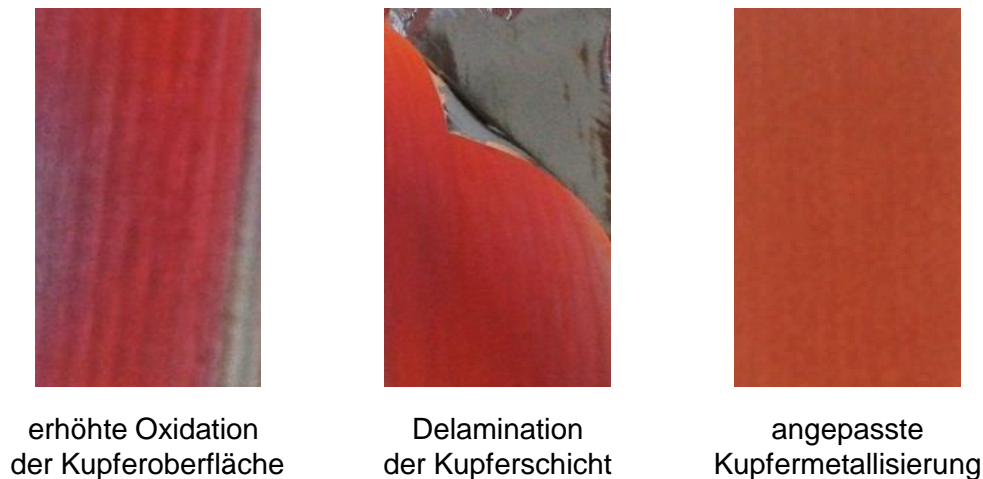


Abbildung 71: Einfluss der Prozessparametervariation auf die Rauheit  $R_z$  der generierten Kupferstrukturen

Allerdings ist dieser Effekt in den vorliegenden Versuchen mit der Variation der anderen Prozessparameter gekoppelt. Dies führt zu einem erneuten Anstieg der Rauheit infolge der Abstandsreduzierung zwischen Düse und Substrat. Das zunehmend größer werdende Schichtwachstum kann bei konstanter Reduzierung des Düsenabstandes und gleichzeitig konstanter Reduzierung des Bahnabstandes schließlich nicht amortisiert werden. Es findet somit eine erneute Überlagerung der Gauß-ähnlichen Strukturen statt, wodurch der Glättungseffekt amortisiert wird. In Bezug auf die beiden Endmetallisierungen Cu und Al ist auch bei Betrachtung der Oberflächenrauheit kein Unterschied zu erkennen.

#### 4.4.2 Fehlerbilder der vollflächigen Wafermetallisierung

Im Zuge der vollflächigen Kupfermetallisierung der vorliegenden Si-Wafer können unterschiedliche Fehlerbilder definiert werden. In Abbildung 72 sind zwei Fehlerbilder angeführt, die eindeutig auf falsche Prozessparameterkombinationen zurückgeführt werden können. Eine erhöhte Oxidation der Kupferoberfläche kann auf eine zu hohe Prozesstemperatur zurückgeführt werden. Folglich sollte diese beispielsweise durch Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit oder des Abstandes zwischen Düse und Substrate reduziert werden.



*Abbildung 72: Exemplarische Darstellung fehlerhafter vollflächiger Kupfermetallisierungen im Vergleich zu einer optimierten Probe*

Differierende Spannungszustände sind meist die Ursache für die Delamination der generierten Struktur. Diese können sich durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten ergeben. In diesem Zusammenhang ist die Prozesstemperatur zu reduzieren sowie ein kontrolliertes Abkühlen der prozessierten Proben notwendig. Eine Zunahme der Prozessgeschwindigkeit reduziert die thermisch induzierten Spannungen während des Metallisierungsprozesses. Eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Plasmadüse und Substratoberfläche ermöglicht eine langsame und gleichmäßige Abkühlung der unterschiedlichen Materialkomponenten, wodurch mechanische Spannungen auf ein Minimum reduziert werden können. In Abbildung 73 sind verschiedene Möglichkeiten der Rissbildung im Zuge des CAPM-Prozesses dargestellt. Es treten sowohl horizontale als auch vertikale Brüche auf, die sich über einen Großteil der Breite der Si-Probe erstrecken können. Des Weiteren können Kombinationen aus beiden Bruchverhalten beobachtet werden. Neben einem kompletten Durchbruch der Wafer, einer partiellen oder vollflächigen Delamination der Metallisierung stellen die abgebildeten Risse einen dritten mechanischen Versagensfall dar. Die Ursache kann für alle Fehlerbilder mit der induzierten Spannung begründet werden. Der Temperaturgradient zwischen dem Gas-Pulver-Gemisch und dem Si-Wafer bei Raumtemperatur ist für die Induktion eines thermomechanischen Spannungszustandes verantwortlich. Umso höher der Gradient, desto größer die Spannung. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (siehe

Tabelle 10) des Materialverbundes erfolgt ein Aufbau der thermischen Spannungen im Zuge der Abkühlung nach dem Beschichtungsprozess. Die Materialien ziehen sich infolge der Abkühlung wieder zusammen. Hierbei entstehen mechanische Spannungen zwischen den einzelnen Materialkomponenten, die sich letztendlich bei Entladung für die Rissbildung verantwortlich sind. Folglich sollte, wie bereits erwähnt, eine vollflächige Kupferbeschichtung von Si-Wafern nur unter definiertem Vorwärmen und kontrolliertem Abkühlen erfolgen. Hierbei ist allerdings im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen aus Kapitel 4.3 zu beachten, dass endmetallisierte Si-Wafer nicht den gleichen thermischen Aufheizkoeffizienten wie technische Keramiken im Zuge der Vorwärmung ausgesetzt werden dürfen, da während der Erwärmung die thermische Ausdehnung ebenfalls zu Spannungsbrüchen führen kann. Folglich ist ein homogenes langsames Vorwärmen anzuraten.

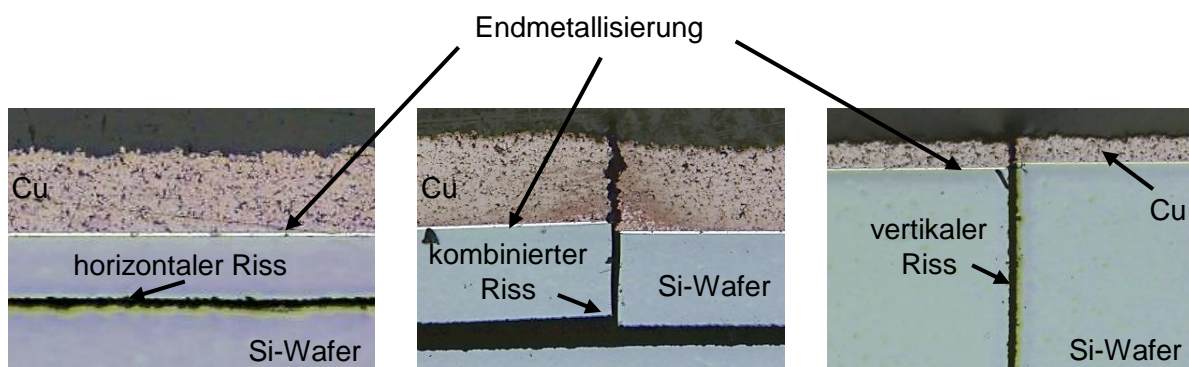


Abbildung 73: Schliffdarstellung verschiedener Rissbildungen im Zuge der vollflächigen Kupfermetallisierung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine CAPM der vorliegenden Si-Wafer-Proben mit Cu- oder Al-Endmetallisierung realisiert werden kann. Des Weiteren wurde gezeigt, dass eine Überlagerung der einzelnen Metallisierungsbahnen die Oberflächenrauheit vermindern kann, jedoch limitiert ist. Möglicherweise können andere Beschichtungsroutrinen, beispielsweise eine alternierende Bahnfolge von geringen und großen Abständen bei mehrmaliger vollflächiger Beschichtung oder ein Drehen des Wafers um 90° nach jeder vollflächigen Beschichtung und gleichbleibendem Bahnabstand, in diesem Zusammenhang eine weitere Reduzierung der Oberflächenrauheit erwirken. Entscheidend ist für die CAPM von Si-Wafern vor allem die Wahl der Prozessgeschwindigkeit und des Abstandes zwischen Plasmadüse und Substratoberfläche, um bei geringer thermischer Belastung eine ausreichende Schichtdicke zu erreichen. In Abhängigkeit weiterführender Prozessschritte (Bonden, AVT) und der sich daraus ergebenden Anforderungen müssen sowohl die Prozessparameter spezifisch optimiert als auch der Probenumfang entsprechend erweitert werden, um quantitative Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der CAPM von Si-Wafern erzielen zu können.

## 4.5 Prozessmodell der CAPM-Technologie

In den vorangegangenen Untersuchungen der Kapitel 4.1 bis 4.4 wurden zahlreiche prozessspezifische Erkenntnisse dokumentiert, welche im Folgenden in einem Prozessmodell zusammengefasst dargestellt werden. Hierbei werden die Wechselwirkungen der einzelnen Prozessparameter und deren Einfluss auf die Eigenschaften (Haftzugfestigkeit, Schichtdicke, Porosität) der generierten Kupferschicht näher betrachtet. Die Darstellung in Abbildung 74 bezieht sich explizit auf die betrachteten Prozesskenngrößen und Substratmaterialien im Zuge dieser Arbeit und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Beispielsweise wird der Einfluss des Metallpulvers (Korngröße, Kornform, Reinheit, Schmelztemperatur), wie in Abbildung 9 dargestellt, im vorliegenden Prozessmodell nicht betrachtet.

Grundsätzlich beeinflussen alle vorliegenden Eingangsgrößen zwei entscheidende Prozessgrößen, die Partikelgeschwindigkeit, welche sich aus Düsenaustritts- und Aufprallgeschwindigkeit der Metallpulverpartikel zusammensetzt, und die Prozesstemperatur, welche in das Anschmelzen der Pulverpartikel in der Plasmadüse und den thermischen Energieeintrag an der Substratoberfläche gegliedert werden kann. Somit ist die Kombination aus diesen beiden Prozessgrößen entscheidend für die Ausgangsgrößen und bestimmt die Eigenschaften der generierten Metallschicht.

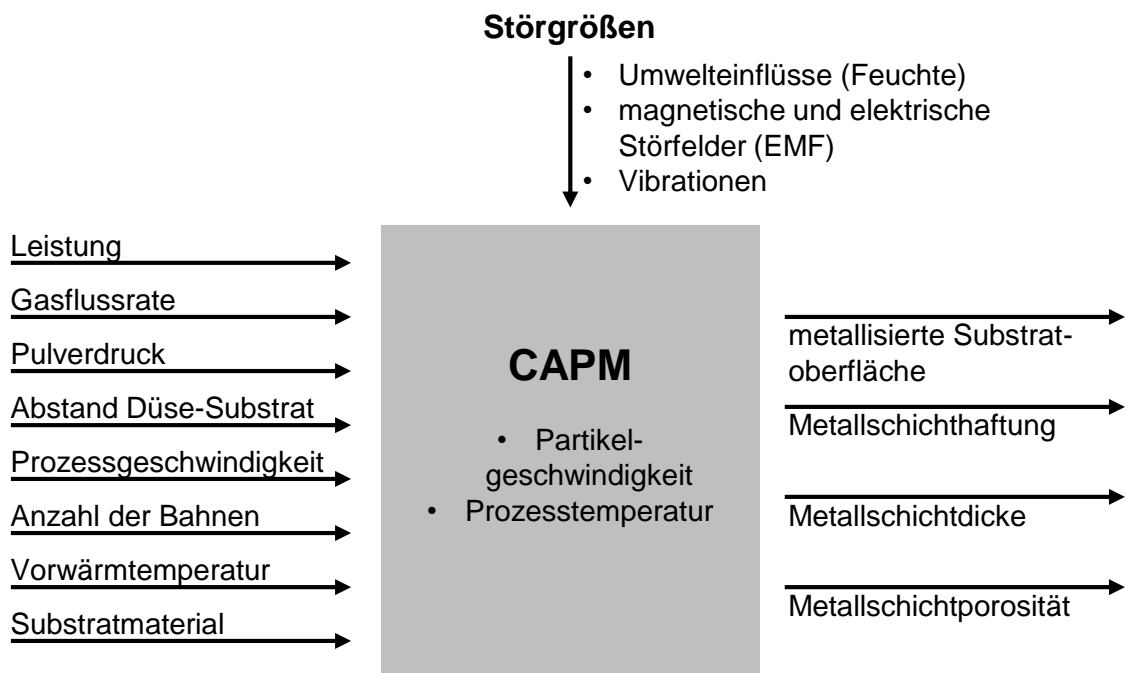


Abbildung 74: Spezifisches Prozessmodell der CAPM-Technologie

Der Einfluss von Störgrößen kann im vorliegenden Prozessmodell auf Umwelteinflüsse, magnetische und elektrische Störfelder (EMF) sowie Vibrationen beschränkt werden. Eine feuchte Umgebung begünstigt und beschleunigt die Oxidation der generierten Kupferschicht und sollte daher vermieden werden. Dagegen ist bei einer Temperaturschwankung im Inneren der Prozesszelle, beispielsweise herbeigeführt durch direkte Sonneneinstrahlung oder infolge eines permanenten Beschichtungs-

prozesses, nicht von einer Störung des Prozessergebnisses auszugehen. Begründet liegt die Annahme zum einen darin, dass die CAPM-Technologie selbst einen thermischen Prozess darstellt, wodurch die Substratkörper erwärmt werden und sich zum anderen die Temperaturschwankungen aufgrund der permanenten Absaugung und Frischluftzufuhr der Prozesszelle in einem engen Temperaturbereich bewegen, welcher keinen ausschlaggebenden Erwärmungseffekt durch Konvektion auf die Substratkörper in der Prozesszelle ermöglicht. Starke EMF können einen Einfluss auf die Ausgangsgrößen erwirken, da die Ausbildung des Lichtbogens beeinflusst werden kann, was sich wiederum in einer veränderten Energieübertragung auf das Trägergas und die Pulverpartikel auswirkt. Vibrationen können sowohl das Substratmaterial als auch die generierte Schicht mechanisch belasten, was zur Rissbildung oder sogar zum Bruch führen kann. Vor allem bei mechanisch sensiblen Probekörpern wie Si-Wafern sollte eine vibrationsfreie Prozessierung angestrebt werden.

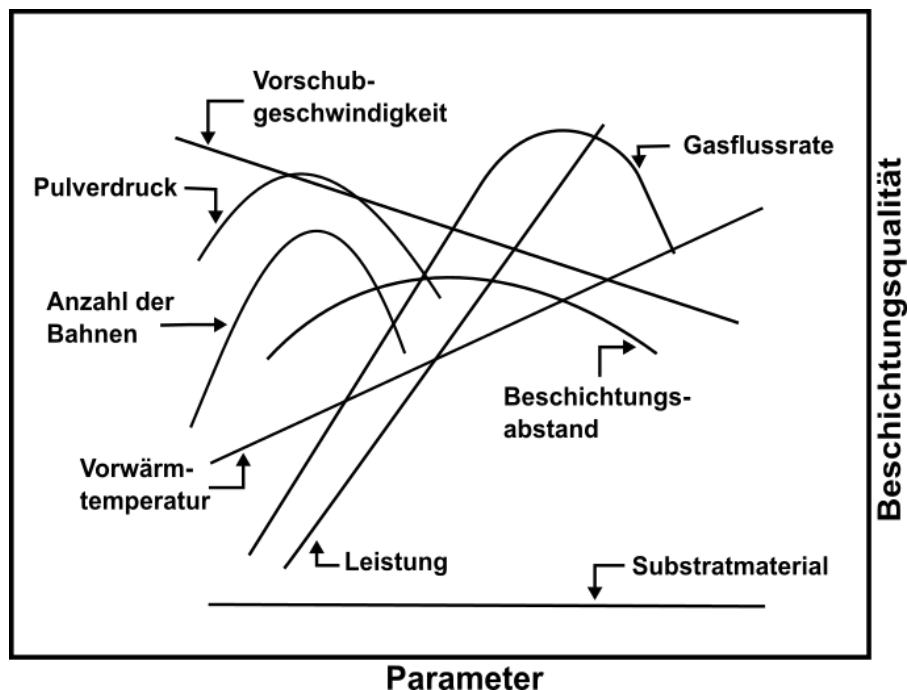


Abbildung 75: Abhängigkeit der Beschichtungsqualität von den Prozessparametern in Anlehnung an [28]

Anhand von Abbildung 75 werden die Einflüsse der Eingangsgrößen auf die Schichtqualität zusammengefasst dargestellt. Hierbei werden die jeweiligen Prozessparameter stets separat und unter der Annahme, dass alle anderen Parameter konstant bleiben, betrachtet. Die in Abbildung 74 gelisteten Prozessparameter wirken sich wie folgt auf das Beschichtungsergebnis (Haftung, Schichtdicke, Porosität) aus:

- Leistung: Eine Steigerung der Leistung des Plasmaerzeugers bedingt eine Erhöhung der Ionisationsenergie innerhalb der Plasmadüse. Folglich kann eine höhere Energiemenge an das Metallpulver übertragen werden, wodurch beim Beschichtungsprozess eine bessere Haftung, eine höhere Schichtdicke und eine geringere Porosität zu erwarten sind.

- **Gasflussrate:** Die Erhöhung der Gasflussrate kann bis zu einem definierten Scheitelpunkt, abhängig von verwendeter Leistung, Pulverdruck und Trägergas, das Metallisierungsergebnis verbessern. Darüber hinaus erfolgt eine zunehmende Verminderung der Schichthaftung und -dicke sowie eine Erhöhung der Porosität infolge der sinkenden Energiedichte des Gasstroms.
- **Pulverdruck:** Ähnlich der Gasflussrate ist auch beim Pulverdruck, wiederum abhängig von vorliegender Leistung, Gasflussrate und Trägergas, eine Erhöhung der Beschichtungsqualität bis zu einem definierten Grenzpunkt zu beobachten. Bei Überschreiten erfolgt eine zunehmende Verminderung der Schichthaftung bei gleichzeitiger Zunahme der Porosität und Reduzierung der Schichtdicke.
- **Beschichtungsabstand:** Der Abstand zwischen Plasmadüse und Substraoberfläche kann in einem relativ breiten Bereich variiert werden, ohne eine qualitative Verschlechterung der generierten Schicht beobachten zu können. In den Grenzbereichen können beispielsweise eine erhöhte Oxidation und Delamination (geringer Abstand) oder eine verminderte Haftung und Dicke (großer Abstand) der Metallschicht detektiert werden.

Die folgenden vier Prozessparameter stellen sekundäre Einflussgrößen dar, da sie keinen direkten Zusammenhang mit dem Plasmaionisierungsprozess haben, sondern nur die Bewegungsgeschwindigkeit und -abfolge oder die Ausgangstemperatur des Substratmaterials bzw. das Material selbst ändern. Nichtsdestotrotz wirken sich diese Eingangsgrößen auf die generierte Kupferschicht aus.

- **Prozessgeschwindigkeit:** Eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit wirkt sich negativ auf den thermischen Energieeintrag aus, wodurch Haftung und Schichtdicke gemindert sowie die Porosität erhöht werden.
- **Anzahl der Bahnen:** Mit einer Zunahme der Bahnanzahl kann vor allem die Schichtdicke gesteigert werden. Ein direkter Einfluss auf die Porosität kann nicht detektiert werden. Eine Delamination der Kupferstruktur infolge erhöhter Bahnanzahlen, wie in Kapitel 4.1 detektiert, ist auf die induzierten thermischen Spannungen pro Beschichtungsüberfahrt zurückzuführen.
- **Vorwärmtemperatur:** Das Vorheizen zeigt einen deutlich positiven Einfluss auf die Haftung, Dicke und Porosität der generierten Kupferstruktur. Da eine sinnvolle Anwendung nur für thermisch leitfähige und gleichzeitig thermisch belastbare Substratmaterialien infrage kommt, ist die Vorwärmtemperatur nicht als allgemeingültige Eingangsgröße zu betrachten.
- **Substratmaterial:** Das Substrat selbst hat einen großen Einfluss auf die Qualität der Metallisierung, da alle Prozessparameter abhängig von den dessen spezifischen Materialeigenschaften konfiguriert werden. Ein direkter Zusammenhang zwischen Substrat und den Schichteigenschaften ist jedoch nicht auszumachen.

Zusammenfassend stellt Abbildung 75 den ersten Überblick bezüglich des Einflusses der einzelnen CAPM-Prozessparameter auf das Beschichtungsergebnis mit Kupfermetallpulver dar. In weiterführenden Arbeiten müssen die physikalischen und chemischen Hintergründe näher betrachtet werden, um allgemeingültige Abhängigkeiten definieren zu können. Vor allem die Wechselwirkungen zwischen primären und sekundären Prozessparametern spielen eine entscheidende Rolle. Beispielsweise wird die thermische Belastung der Substratoberfläche durch eine Reduzierung des Abstandes zwischen Plasmadüse und Substrat erhöht, wodurch eine Reduzierung der Porosität und eine Erhöhung der Schichtdicke pro Beschichtungsbahn erwartet wird. Gleiches ist auch durch eine Reduzierung der Prozessgeschwindigkeit möglich. Inwiefern sich die jeweiligen Parameteränderungen oder eine Kombination aus beiden auf die Schichteigenschaften auswirken sollte sowohl in einer theoretischen Betrachtung anhand von mathematischen Gleichungen in Bezug auf die Partikelgeschwindigkeit und die Prozesstemperatur eruiert als auch mit chemischen Analysen, wie beispielsweise der Haftung in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit oder der Porosität abhängig von der Prozesstemperatur, anhand von praktischen Versuchsmustern evaluiert werden.

## 5 Thermische Simulation des CAPM-Prozesses

Die Ergebnisse aus Kapitel 4 zeigen deutlich die Potentiale der CAPM-Technologie auf. Es können Thermoplaste, Faserverbundkunststoffe, Keramiken und Halbleitermaterialien den möglichen Anwendungen entsprechend mit Kupfer beschichtet werden. Eine Optimierung der Prozessparameter muss abhängig vom verwendeten Substratmaterial und den Anforderungen des Einsatzgebietes angepasst erfolgen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Einschränkung der Prozessparameter hinsichtlich der gewünschten Eigenschaften schnell erfolgen kann. Die Definition des finalen Parametersatzes erfordert hingegen umfangreiche Versuchsreihen, was stets mit einem entsprechenden Kosten- und Zeitaufwand verbunden ist. In diesem Zusammenhang würde eine thermische Simulation des Beschichtungsprozesses eine erhebliche Vereinfachung des Evaluierungsprozesses bedeuten. Hiermit können der Temperaturverlauf während der Beschichtung und die Abkühlung des Werkstücks bestimmt werden. Folglich ist der Einfluss variierender Prozessparameter auf die maximale Prozesstemperatur schnell und einfach zu bestimmen, was eine enorme Einsparung an Zeit und Kosten im Hinblick auf die optimalen Metallisierungsparameter ermöglicht.

Im Zuge des folgenden Kapitels wird eine aufwandsoptimierte thermische Simulation auf Basis von ANSYS erstellt. Grundlage der Simulation ist ein modularer Substratkörper, der hinsichtlich seiner geometrischen Abmessungen und der spezifischen Werkstoffkenndaten angepasst werden kann. Zusätzlich können der Durchmesser des Plasmastrahls, die thermische Leistung (Wärmestrom) und die Prozessgeschwindigkeit frei gewählt werden. Der Durchmesser des Plasmastrahls wird durch die Abstandänderung zwischen Düse und Substratoberfläche beeinflusst. Folglich ändert sich die Prozessfläche und mit dieser die Energietransferzone. Der Wärmestrom beinhaltet die thermische Energie des Plasmastrahls. Das übergeordnete Ziel ist die Programmierung einer Basissimulation, die eine schnelle und unkomplizierte Variation ausgewählter Prozessparameter erlaubt und einen Überblick über die thermischen Verläufe im Zuge des CAPM-Prozesses ermöglicht.

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) zählt zu einem Standardinstrument in der Entwicklung. Vor allem in der Automobilindustrie, der Luftfahrt sowie dem Anlagen- und Maschinenbau ist FEM sehr verbreitet. Die Übertragung aufwändiger Versuchsreihen in die Simulation kann eine erhebliche Verkürzung der Produktentwicklungszyklen ermöglichen. Der Ausgangspunkt einer jeden Simulation basiert auf einem physikalisch-technischen Modell, welches das Problem hinreichend darstellt. Hierzu werden die Erhaltungssätze, Minimalprinzipien sowie Stoffgesetze zur Beschreibung genutzt und daraufhin das Modell mit Hilfe von Differentialgleichungen mathematisch gestaltet. Die Abbildung des realen Problems durch ein FE-Modell ist meist nur mit vorher getroffenen Vereinfachungen möglich. Ob das generierte Modell den realen Sachverhalt hinreichend abbildet, muss im Nachhinein durch den Vergleich von Simulations- und praktischen Versuchsergebnissen validiert werden. Als nächstes erfolgt



die sogenannte räumliche Diskretisierung. Hiermit wird eine Aufteilung des Rechengebietes vorgenommen. Es stehen verschiedene Möglichkeiten zu Diskretisierung zu Verfügung, beispielsweise die FEM, das Differenzenverfahren, Finite-Volumen-Methoden oder verschiedene Randelemente-Methoden. Nachdem das Diskretisierungsverfahren algorithmisch aufbereitet und implementiert ist, startet die eigentliche Simulation. Abschließend müssen die erhaltenen Resultate vom Bearbeiter auf Genauigkeit und Gültigkeit hin übergeprüft werden. [119; 120]

Für eine vollständige Beschreibung des vorliegenden Problems werden bei der FEM die Geometrie, die Feldgleichungen im Gebiet, die Randbedingungen und bei zeitabhängigen Problemen die Anfangsbedingungen benötigt. Die Geometrie bzw. die Struktur des vorliegenden Körpers wird in kleine Elemente separiert. Für jedes Element werden die erforderlichen Geometrien zur Berechnung der Gleichungen dargestellt. Anschließend werden alle Segmente durch Knoten miteinander vernetzt, auf welche mechanische, elektronische, thermische, magnetische oder fluiddynamische Veränderungen bzw. Einflüsse einwirken. Diese sind durch die Unbekannten, die jedem Knoten zugeordnet sind, definiert und werden Freiheitsgrade genannt. Aus der Summe an Elementen, Knoten und Unbekannten werden mathematische Gleichungen erstellt, die schlussendlich von der Simulationssoftware gelöst werden. Aus den Verschiebungen der Knoten werden die Lösungen für die jeweiligen Elemente ermittelt. Abschließend werden alle Teillösungen aufsummiert, um die Gesamtlösung für das System abzubilden. Die Anzahl der Elemente bzw. der Teillösungen ist endlich, woraus sich der Name Finite-Element-Methode ableitet. [119; 121; 122]

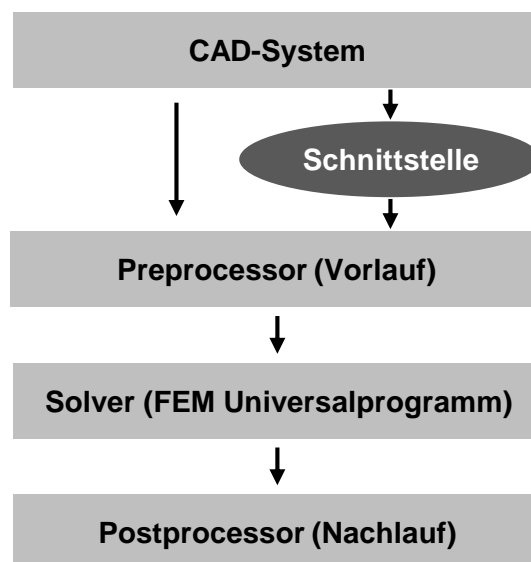


Abbildung 76: Prozessschritte der FEM-Simulation [119]

Abbildung 76 zeigt den klassischen Ablauf einer FEM. Mit Hilfe eines integrierten CAD-Systems werden die Geometrien der Elemente an den Preprocessor übergeben, welcher die Vernetzung der Elemente vornimmt. Folgend werden die inneren und äußeren Randbedingungen in den Solver eingegeben und die Simulation durchgeführt bzw. die Lösungen für die einzelnen Gitterpunkte erzeugt. Die finalen Lösun-

gen werden im Postprocessor verarbeitet und als Grafiken oder Tabellen ausgegeben. ANSYS basiert auf der FEM und trifft Vorhersagen darüber, wie sich Strukturen in realer Umgebung verhalten. Es wird eine klassische programmeigene Skriptsprache namens Parametric Design Language (APDL) verwendet mit deren Hilfe die Simulation und die Eingabe der Befehle erfolgt. Es können drei Möglichkeiten der Befehlseingabe unterschieden werden:

- Eingabe über die Kommandozeile der Software
- Einlesen einer Eingabe-Datei
- über die graphische Oberfläche; hier wird im Hintergrund ein identischer Befehl erzeugt [123]

## 5.1 Modellierung des Beschichtungsprozesses

Der CAPM-Prozess besteht aus zahlreichen Komponenten, wie der Düse, dem Substratmaterial und den Pulverpartikeln. Jede dieser Komponenten hat einen Einfluss auf die Temperaturverteilung, welche von der Erwärmung der Düse bis hin zum Wärmetransfer des Trägergas-Pulver-Gemisches an die Umgebung reichen. Um den gewünschten Prozess simulieren zu können, wird der reale Sachverhalt in Form eines abstrahierten und vereinfachten Modells dargestellt. Nach der Entwicklung des vereinfachten Modells werden die Prozessparameter, die für spätere Simulation benötigt werden, definiert.

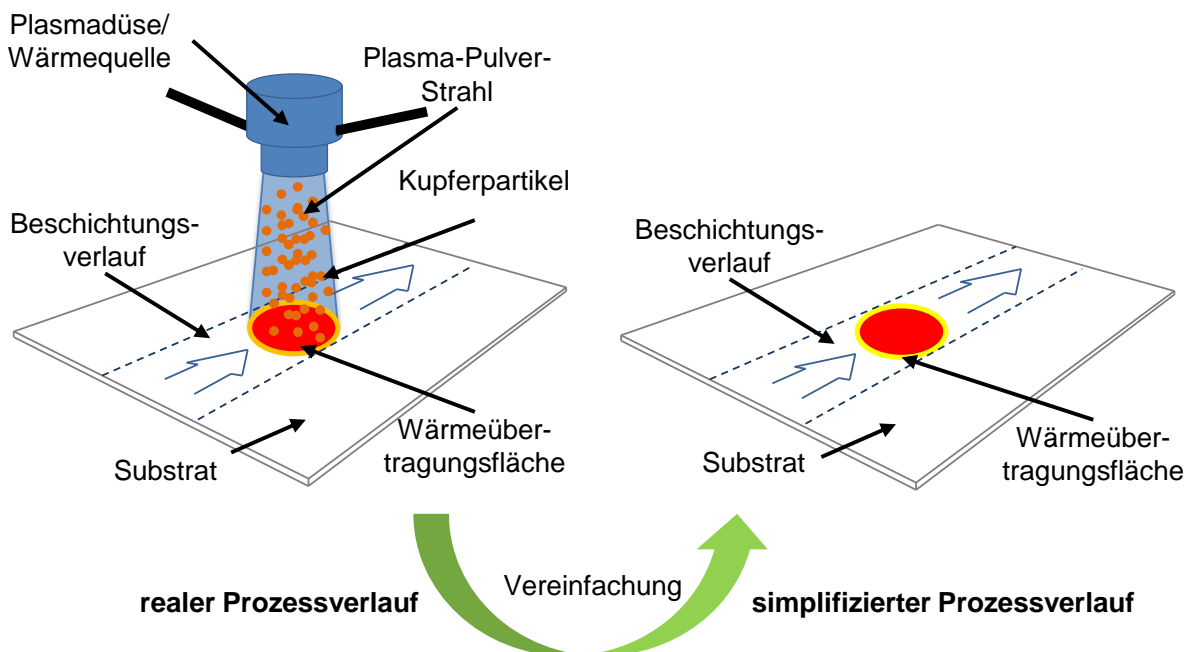


Abbildung 77: Schematische Darstellung des realen Prozessverlaufs (links) im Vergleich mit der vereinfachten Darstellung (rechts)

Die Realisierung eines ausreichend genauen Modells setzt eine Orientierung an Kriterien, welche für die Simulation bedeutsam sind, voraus. Folgende Kriterien bzw.

Anforderungen sind bei der Modellerstellung im Hinblick auf die Simulation zu berücksichtigen:

- modularer Aufbau
- zeitabhängige Analyse der Temperaturverteilung
- geringe Komplexität

Auf Basis der genannten Kriterien werden folgende Annahmen und Vereinfachungen für das Modell getroffen:

- das Ziel ist die Darstellung der Temperaturverteilung im Substratmaterial
- es findet keine mechanische Verformung des Substrats infolge der thermischen Belastung statt
- das Substrat bewegt sich mit linearer definierter Geschwindigkeit
- der Plasma-Pulver-Strahl trifft senkrecht auf das Substrat auf
- das Temperaturprofil innerhalb des Plasma-Pulver-Strahls wird als homogen angenommen
- Konvektion mit der Umgebung wird berücksichtigt

Abbildung 77 zeigt eine schematische Darstellung des realen CAPM-Prozessverlaufs im direkten Vergleich mit der vereinfachten Annahme. Die genannten Punkte und das Ziel, mit Hilfe einer möglichst einfachen Simulation ein relativ genaues Ergebnis zu erzielen, sind für die starke Abstrahierung des Prozesses verantwortlich. Die eigentliche Wärmequelle bzw. die Plasmadüse und der Plasmastrahl sowie die Partikel werden durch einen beweglichen Kreis ersetzt, innerhalb dessen der Wärmestrom mit einer homogenen Verteilung angenommen wird. Die zeitabhängige Temperaturverteilung wird mit Hilfe einer thermisch-transienten Analyse berücksichtigt. Hierbei werden zeitdynamische Effekte betrachtet bzw. die dynamische Antwort eines Systems unter Einwirkung einer zeitlich veränderlichen Last bestimmt. Die Konvektion des Substrates und der umgebenden Atmosphäre wird durch eine Randbedingung in die Simulation aufgenommen. Zusammenfassend ergibt sich die vereinfachte Darstellung in Abbildung 77. Der einfache Aufbau des Modells bedingt eine erhebliche Zeitersparnis bei der Lösung der Rechnungen durch den Solver. [121]

### **Geometrie und Werkstoff des Substrats**

Die Geometrie des Substrats wird im Preprocessor definiert und anschließend grafisch dargestellt. Im vorliegenden Fall handelt es sich um planare Werkstücke mit einem rechteckigen Querschnitt. Die thermische Simulation benötigt drei spezifische Kennwerte des verwendeten Werkstoffs, die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität, um die Erwärmung während des Beschichtungsprozesses darstellen zu können.

### **Vernetzung der Geometriekörper**

Nach der Erstellung des Substratkörpers folgt die Vernetzung. Dieser Vorgang wird auch meshen (von engl. Mesh: Netz) genannt. Hierbei wird der Körper im Zuge der Diskretisierung in kleine Elemente und Knoten zerlegt. Je feiner das Netz ist bzw. je kleiner die Elemente sind, desto genauer ist das Ergebnis. Jedoch nimmt die Rechenzeit bei steigender Netzfeinheit zu. Hier gilt es zwischen Zeitaufwand und Detailgrad der Simulation abzuwägen. Die rechteckige Geometrie des Substrats bedingt eine Aufteilung in quadratische Elemente, welche für alle Simulationen eine Seitenlänge von 1 mm aufweisen.

### **Umgebungstemperatur und Konvektion**

Für alle folgenden Untersuchungen wird eine Umgebungstemperatur von 20 °C angenommen. Für eine Berechnung der Konvektion zwischen erwärmtem Substrat und der Atmosphäre ist die Geschwindigkeit der umgebenden Luft erforderlich. Diese wird mit Hilfe der Luftdichte direkt über dem Substrat und in der Prozesskammer berechnet. Für das Substrat wird auf Basis von empirischen Versuchswerten verschiedener Werkstoffe aus Kapitel 4 ein Wert von 200 °C angenommen, welcher als Mittelwert für die gesamte erhitzte Fläche betrachtet werden kann.

### **Durchmesser der Wärmequelle**

Da eine Vergrößerung des Plasmastrahldurchmessers vernachlässigt wird, kann dieser unabhängig vom Abstand der Düse zur Substratoberfläche mit einem konstanten Wert von 4 mm angenommen werden.

### **Geschwindigkeit der Düse**

Die Prozessgeschwindigkeit wird durch die Geschwindigkeit des erhitzten Radius dargestellt. Je höher diese, desto weniger Energie wird infolge der geringeren Verweilzeit der Wärmequelle an einem Ort übertragen. Eine Abnahme der Werkstücktemperatur bei zunehmender Geschwindigkeit ist zu erkennen. Der Wert kann in der Simulation beliebig angepasst werden.

### **Wärmestromdichte**

Innerhalb der Wärmeübertragungsfläche wird eine thermische Last auf das Substrat aufgebracht. Der Wärmestrom stellt die Wärmeenergie dar, welche durch den Plasmastrahl auf das Substrat übertragen wird. Die Wärmestromdichte bezeichnet den Energieeintrag für eine bestimmte Fläche. Sie berechnet sich als Quotient des Wärmestroms und der Fläche des erhitzten Radius. Hier gilt es zu beachten, dass die Wärmestromdichte auf jedes der einzelnen Mesh-Elemente anzuwenden ist. Folglich teilt sich die Wärmestromdichte des Plasmastrahls auf die einzelnen Elemente auf. Die kinetische Energie der aufprallenden Kupferpartikel wird hierbei vernachlässigt.

## 5.2 Programmierung des Modells

Das vereinfachte Modell des realen Prozesses bildet die Grundlage für die Simulation in ANSYS. Wie bereits erwähnt, wird die Programmiersprache APDL verwendet, um eine Eingabedatei zu erstellen. Diese beinhaltet alle Codes, die zur Steuerung des Prozesses benötigt werden. Um die Bewegung der Wärmequelle in Abhängigkeit der Zeit realisieren zu können, wird ein sogenanntes Feld (Array) verwendet. In diesem werden für jeden Zeitschritt die Randbedingungen für die Knoten des vernetzten Körpers gespeichert und anschließend angewendet. Im Vordergrund steht die Bewegung der Wärmequelle, das heißt die Wärmeverluste werden noch nicht berücksichtigt. Im Folgenden wird das allgemeine Vorgehen der Programmierung kurz erläutert.

Zu Beginn werden die Geometrie und die spezifischen Werkstoffkennwerte des Substratkörpers festgelegt, die Vernetzung der Einzelelemente definiert und die Daten an den Preprocessor übergeben. Für die thermische Simulation sind die Kennzahlen Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Bedeutung, um das Materialverhalten abbilden zu können. Für die angeführten Untersuchungen wird  $\text{Al}_2\text{O}_3$  verwendet. Im nächsten Schritt wird die Geschwindigkeit der Düse sowie die räumliche Länge eines Zeitschrittes definiert. Hieraus berechnet sich wiederum die Dauer des einzelnen Zeitschrittes. Auf Basis dieser Kennwerte kann das dreidimensionale Array aufgebaut werden.

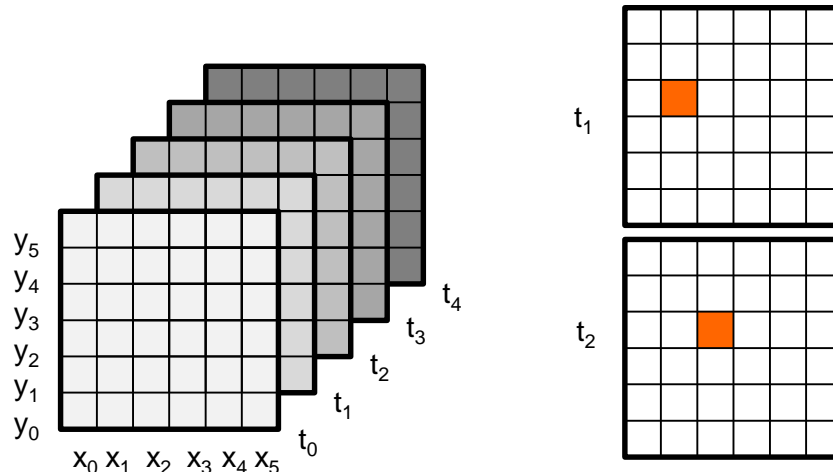


Abbildung 78: Schematische Darstellung der Array-Struktur

Das Array weist in x-, y- und z-Richtung jeweils eine Dimension auf, wobei die z-Achse als Zeitlinie definiert wird und im Folgenden mit der Variable  $t$  bezeichnet wird. Die Definition des Arrays darf nicht mit dem globalen Koordinatensystem verwechselt werden, welches zu jeder Zeit die räumlichen x-, y- und z-Koordinatenrichtungen beinhaltet. Wie in Abbildung 78 links dargestellt, sind die einzelnen Ebenen in  $t$ -Richtung des Arrays in Felder unterteilt. Das Array bildet so das vernetzte Werkstück nach. Folglich hat es in x- und y-Richtung die gleichen Maße wie der Probekörper und die Abmessungen der einzelnen Felder sind identisch zu denen der

Mesh-Elemente. In die Felder jeder Ebene wird der Betrag der Wärmestromdichte eingetragen. Für jeden Zeitpunkt wird daraufhin die jeweilige Ebene des Arrays auf die Substratoberfläche projiziert und somit der entsprechende Wärmestrom implementiert. Mit Hilfe dieser Programmierung kann die Wärmequelle in Abhängigkeit der Zeit in einem variablen Muster mit einer definierten Geschwindigkeit über das Substrat bewegt werden. Schematisch ist dieser Sachverhalt in Abbildung 78 rechts dargestellt. Die Wärmequelle wandert von Zeitpunkt  $t_1$  auf  $t_2$  und legt damit die Länge eines Elementes zurück.

Die Reihe mit der y-Koordinate und die Spalte mit der x-Koordinate werden zur Beschriftung der Indizes des Arrays verwendet, ähnlich der eines Koordinatensystems. Hier werden die Koordinaten der Elemente des realen Substrates eingetragen, um die Felder später auf dem Substrat zuordnen zu können. Im Feld (x0, y0) wird der Zeitpunkt für die jeweilige Ebene eingetragen. Nach dem Aufbau des Arrays beginnt die thermisch-transiente Simulation. Das Ergebnis der Simulation wird daraufhin als Animation ausgegeben. Hierbei kann das thermische Verhalten des Substrats für jeden Zeitschritt analysiert werden. Auf Grundlage der Array-Programmierung werden verschiedene Beschichtungsabläufe erstellt:

- das Substrat wird mit einer Überfahrt mittig metallisiert
- das Substrat wird mittig mit zwei Überfahrten metallisiert
- das Substrat wird mit einer Edelstahlmaske versehen und mit einer Überfahrt mittig metallisiert

### Implementierung der Konvektion

Wie bereits in Kapitel 5.1 angedeutet, wird die Simulation des CAPM-Prozesses durch Berücksichtigung der Konvektion und des Abstandes zwischen Düse und Substratoberfläche weiterhin an den realen Plasmaprozess angepasst. Die Bestimmung und Implementierung der Konvektion wird im Folgenden ausführlich angeführt.

Die Berechnung der Konvektion basiert auf der Luftdichte, welche sich in Formel (5.1) berechnet.

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \quad (5.1)$$

$p$ : atmosphärischer Luftdruck = 101325 Pa

$R_s$ : Gaskonstante für trockene Luft = 287,058 J/kgK

$T$ : konstante Substrattemperatur = 473,15 K, konstante Kammertemperatur = 293,15 K

Mit Hilfe der berechneten Dichte für die Werkstoffplatte (5.2) und die Prozesskammer (5.3) kann in (5.4) auf den Druckunterschied geschlossen werden.

$$\rho_{\text{Platte}} = 0,7460 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (5.2)$$

$$\rho_{\text{Kammer}} = 1,2041 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (5.3)$$

$$\Delta p = h g (\rho_2 - \rho_1) = 0,8988 \text{ Pa} \quad (5.4)$$

*h: Abstand zwischen Substrat und Decke der Prozesskammer = 0,2 m*

*g: Erdbeschleunigung*

Mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung kann die Geschwindigkeit der Luft berechnet werden:

$$\Delta p = \frac{\rho_{\text{Kammer}}}{2} v^2 \quad (5.5)$$

$$v = 1,2218 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.6)$$

Im nächsten Schritt kann durch die Nusselt-Zahl auf den konvektiven natürlichen Wärmeübergangskoeffizienten geschlossen werden. Die Nusselt-Zahl ist eine dimensionslose Zahl aus der Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung. Bei turbulenter Strömung und einer ebenen Platte ist diese in (5.7) definiert. [124]

$$\text{Nu} = \frac{0,037 \times \text{Re}^{0,8} \text{Pr}}{1 + 2,443 \text{Re}^{-0,1} (\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (5.7)$$

*Pr: Prandtl-Zahl*

*Re: Reynolds-Zahl*

Die Prandtl-Zahl setzt sich aus der kinematischen Zähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit des umgebenden Fluides zusammen:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = 0,7675 \quad (5.8)$$

*$\nu$ : kinematische Zähigkeit von Luft bei 20 °C =  $153,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$*

*$a$ : Temperaturleitfähigkeit von Luft bei 20 °C =  $20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$*

Die Reynolds-Zahl berechnet sich in (5.10) aus der charakteristischen Weglänge, der Geschwindigkeit der Luft und der kinematischen Zähigkeit der Luft. Die Weglänge wird im vorliegenden Fall auf 0,1 m aufgerundet, da der Plasmastrahl bereits bevor er auf die Substratoberfläche auftrifft, Wärme abgibt und die Luft in Bewegung versetzt.

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu} = 7959,8864 \quad (5.9)$$

*V: Geschwindigkeit der Strömung = 1,2218 m/s*

*L: charakteristische Weglänge = 0,1 m*

*$\nu$ : kinematische Zähigkeit von Luft bei 20 °C =  $153,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$*



Mit Hilfe der berechneten Größen ergibt sich für die Nusselt-Zahl:

$$\text{Nu} = 44,6893 \quad (5.10)$$

Mit Hilfe der ursprünglichen Definition der Nusselt-Zahl wird der Wärmeübergangskoeffizient, der für die Simulation benötigt wird, bestimmt:

$$\text{Nu} = \frac{hL}{\lambda} \quad (5.11)$$

$$h = 5,8543 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (5.12)$$

$h$ : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

$L$ : charakteristische Länge = 0,2 m

$\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit Luft = 0,0262 W/m\*K

Dieser Parameter wird in den nachfolgenden Simulationen auf alle Knoten an der Außenseite des Substrats angewendet, um die Wärmeabgabe an die Luft zu berücksichtigen. Der Einfluss auf die Maximaltemperatur ist nur marginal. Eine genaue Betrachtung bei definierten Zeitschritten macht lediglich eine Reduzierung von maximal 0,05 °C aus. Folglich ist die Definition der Konvektion in der aktuellen Form für das Simulationsergebnis zu vernachlässigen. Der Hauptgrund liegt in der statischen Berechnung. Es wird sowohl die Bewegung des Substratkörpers, als auch die Bewegung des laminaren Luftstroms, der von der Decke der Prozesskammer zur Absaugung am Boden führt (siehe Abbildung 28), nicht berücksichtigt. Zusätzlich findet aktuell nur eine Anwendung auf die Knoten an der Außenseite des Substrats statt. Die Konvektion findet jedoch an allen Knoten des Substrates und besonders stark im direkten thermischen Einflussbereiches der Übertragungsfläche statt. Eine Implementierung dieses Szenarios ist allerdings sehr komplex und aufwändig, da für jeden Knoten dynamisch sowohl die Erwärmung als auch die Abkühlung durch Konvektion unmittelbar aufeinander folgend berechnet werden müssen. Mit den aktuell für diese Arbeit vorliegenden Rechensystemen ist dies nicht möglich.

### 5.3 CAPM ohne Maskierung

Zu Beginn werden für jeden der in Kapitel 5.2 genannten Prozesssimulationen die Geometrie des Substrats, dessen Materialkenndaten und die gewünschte Vernetzung eingepflegt. Für die ersten beiden Beschichtungsszenarien, mittig einfache, und mittig doppelte CAPM, sind diese identisch. Das verwendete Substrat hat eine Länge von 65 mm, ist 35 mm breit und 0,6 mm dick. In der Simulation wird es hochkant dargestellt. Der Eckpunkt des Rechtecks befindet sich nicht im Koordinatenursprung, sondern um 10 mm in x-Richtung versetzt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass im realen Prozess der Plasmastrahl gezündet wird bevor das Werkstück darunter hindurchgeführt wird. Des Weiteren wird bei mehreren Überfahrten nicht direkt an der Substratkante die Bewegungsrichtung umgekehrt, sondern einige Millimeter weiter verfahren, um auch bei mehreren Überfahrten stets die gleichen Beschichtungsbe-

dingungen gewährleisten zu können. Die Berücksichtigung dieses Umstandes wird besonders wichtig, wenn später der Rückweg der Düse in die Simulation eingebunden wird. Die Definition der spezifischen thermischen Eigenschaften des Substrats (Dichte, thermische Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) erfolgt durch drei Variable. Das Mesh der äquivalenten Vernetzung wird in den Untersuchungen konstant bei 1 mm gehalten.

### **Simulation einer geradlinigen Metallisierungsüberfahrt**

In dieser Simulation wird das Werkstück mit einer definierten Geschwindigkeit einmal unter dem Plasmastrahl hindurch verfahren. Die Programmierung bildet die Basis für die beiden folgenden Beschichtungsprozesse. Zuerst wird der Solver aufgerufen und die Art der Oberflächenbeanspruchung in Form des Wärmestroms festgelegt. Die Prozessgeschwindigkeit wird mit 50 mm/s festgesetzt. Der Zeitschritt  $t_1$  berechnet sich automatisch als Quotient aus der angegebenen Länge und Geschwindigkeit. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Durchmesser der Wärmequelle, welcher 4 mm beträgt. Die Wärmestromdichte wird in Abhängigkeit der Leistungsdaten des Plasmaerzeugers und der Übertragungsfläche berechnet und mit  $8.000.000 \text{ W/m}^2$  angenommen. Die Umgebungstemperatur beträgt  $20^\circ\text{C}$ . Die Dimensionen des Arrays gleichen den Dimensionen des Werkstücks. In x-Richtung werden aufgrund des zusätzlichen Fahrtweges zweimal 10 mm addiert. Da jeder Zeitschritt in x-Richtung 1 mm zurücklegt, ist das Maximum in t-Richtung in diesem Fall identisch zu dem in x-Richtung. Mit Hilfe der Euklid'schen Abstandsformel wird die Distanz eines jeden Feldes zum Kreismittelpunkt der Wärmequelle berechnet. Die y- sowie die z-Koordinate können als konstanter Wert festgelegt werden, da ausschließlich eine Bewegung in x-Richtung erfolgt bzw. das Substrat eine feste Dicke aufweist. Mit Hilfe einer Schleife wird für jeden Zeitpunkt die passende Ebene des Arrays auf die Oberfläche des Substrats gelegt, wodurch der Wärmestrom als Last auf die Oberfläche einwirken kann. Die Zeitvariable erhöht sich bei jedem Durchlauf der Schleife. Dieser sukzessive Vorgang läuft vom Zeitpunkt  $t_1$ , dem Start der Bewegung, bis zum Ende der Bewegung. Jeder Durchlauf der Schleife wird im Solver gelöst und das Ergebnis gespeichert.

In Abbildung 79 sind Auszüge aus dem Simulationsverlauf der einfachen Metallisierungsüberfahrt angeführt. Die Wärmequelle und die thermische Ausbreitung sind darin sehr präzise und flüssig dargestellt. Der Verlauf der thermischen Last und die verschiedenen Temperaturzonen sind klar zu erkennen. Mit Hilfe der Skala am unteren Rand kann der Temperaturverlauf, abhängig von den einzelnen Zeitschritten, gut beobachtet werden. Bezüglich der qualitativen Ergebnisse kann die Simulation somit als zufriedenstellend bewertet werden. Die quantitative Bewertung erfolgt anhand der Daten des Postprocessors. Die quaderförmige Vernetzung bedingt die eckige Ausprägung der Wärmequelle. Insgesamt ist der erhitzte Bereich relativ schmal ausgeprägt, was auf die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Substratmaterials Aluminiumoxid zurückzuführen ist. Die Maximaltemperatur liegt, kurz vor dem Ende der Überfahrt an

der Kante, bei 280 °C. Die Position der Maximaltemperatur ist der Tatsache geschuldet, dass die Wärme an der Kante nicht mehr in alle Richtungen verteilt werden kann..

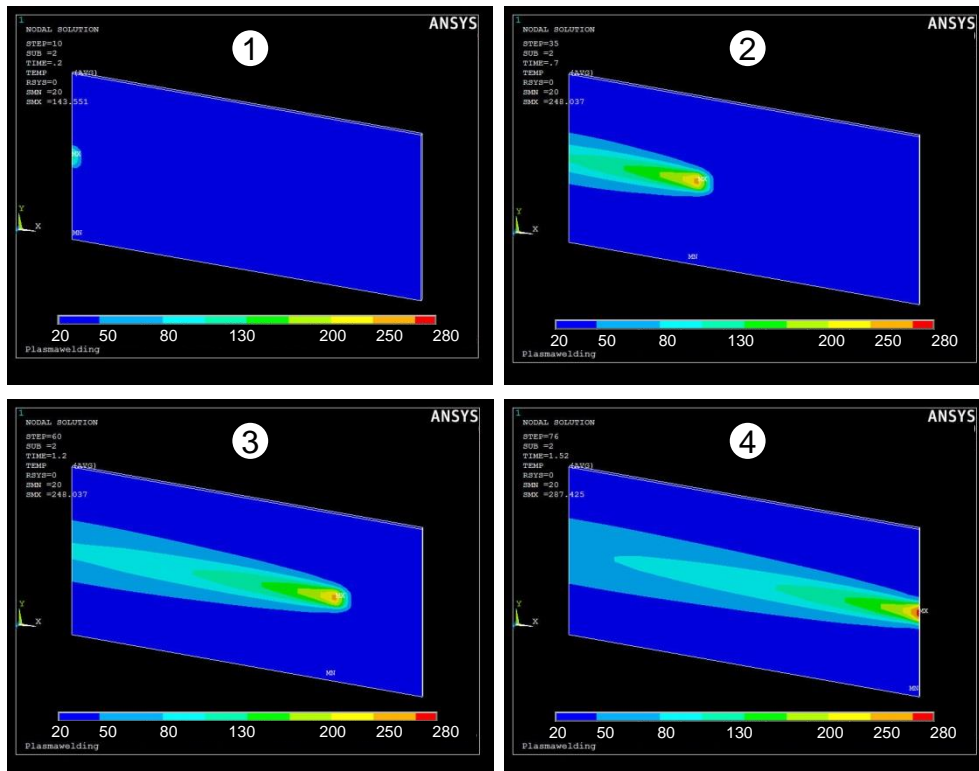


Abbildung 79: Simulationsverlauf einer einfachen Metallisierungsüberfahrt

## Simulation einer doppelten geradlinigen Metallisierungsüberfahrt

Die Programmierung ist ähnlich der einfachen Überfahrt aufgebaut, es kommt nur der Rückweg hinzu, sodass eine doppelte Beschichtung des Werkstücks an gleicher Stelle entsteht. Die Parameter unterscheiden sich hierbei nicht. Die thermische Leitfähigkeit der bereits abgeschiedenen Kupferstruktur wird vernachlässigt. Für eine Simulation der Rückwärtsbewegung zum Ausgangspunkt werden die Länge und die Anwendung des Feldes entsprechend geändert. Der zweite Beschichtungsablauf wird durch eine Spiegelung des Wärmestroms am Wendepunkt der Düse in das Array eingetragen. Zunächst muss für das Array das Maximum in Zeitrichtung auf das Doppelte erhöht werden, um zwei Beschichtungsbahnen simulieren zu können. Anschließend wird mit einem zweiten Befehl der Wärmestrom im Array mit Hilfe der Laufvariablen an der Array-Ebene gespiegelt. Gleiches findet mit den nicht erwärmten Elementen statt. Der zweite Schritt ist die Beschriftung der gespiegelten Array-Ebenen mit der zugehörigen Zeit. Hierbei wird den Ebenen für den Rückweg der Düse die entsprechende Zeit zugewiesen. Schließlich ist das Array in Zeitrichtung doppelt so lang wie beim einfachen Beschichtungsablauf, obwohl der Parameter Zeit nicht geändert wird. Folglich kann auf Basis der Vervielfachung der Array-Länge einfach und fehlerfrei gearbeitet werden. Bei der Anwendung des Arrays bzw. der eigentlichen Simulation muss lediglich beachtet werden, dass der Endzeitpunkt Schleif-

fe erhöht werden muss. In diesem Fall auf die doppelte Zeit der einfachen Beschreibung. Der Prozess kann auch mit Hilfe von zwei Arrays programmiert werden, was sich jedoch wesentlich komplexer darstellt. Vor allem bei einer weiteren Zunahme an Überfahrten ist ein erhöhter Programmieraufwand die Folge.

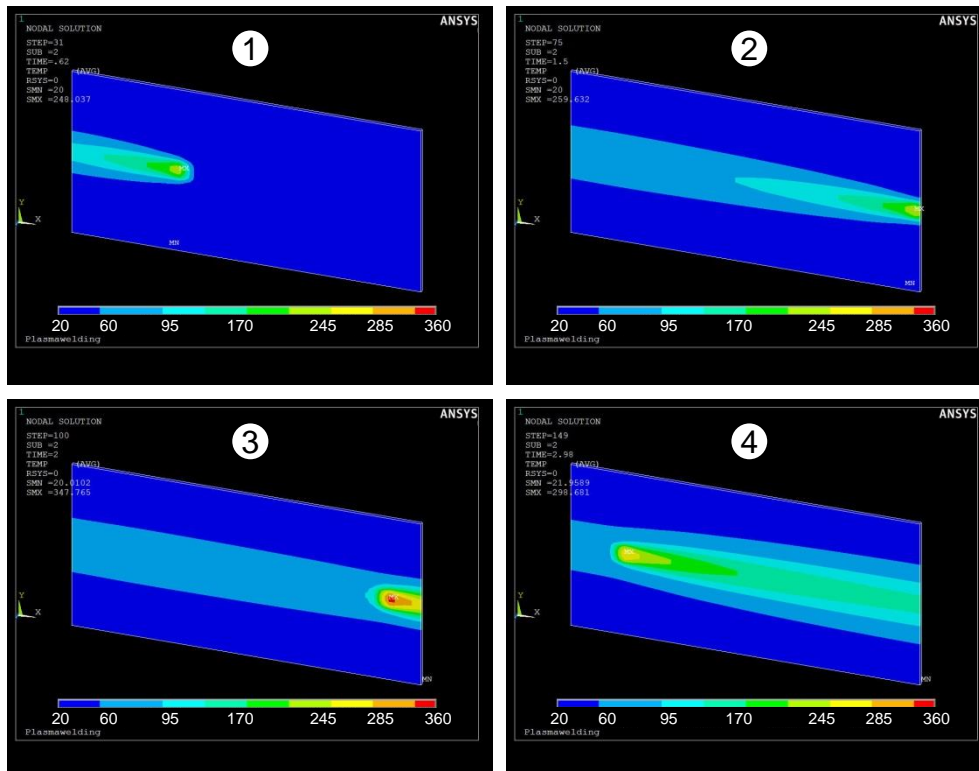


Abbildung 80: Simulationsverlauf einer doppelten Metallisierungsüberfahrt

Bei einer Betrachtung der doppelten Metallisierungsüberfahrt ist vor allem der Rückweg interessant. Die Maximaltemperatur von 360 °C an der Substratoberfläche wird hier zu Beginn des Rückweges erreicht (siehe Abbildung 80). Das Ergebnis deckt sich mit den Erwartungen, da die Erwärmung des Substrates bei Beginn des Rückweges an der Kante am höchsten ist (siehe hierzu auch Abbildung 79). Folglich muss bei einer mehrfachen Metallisierungsüberfahrt speziell beim Wechsel der Bewegungsrichtung auf die Temperaturfestigkeit des Substrats geachtet werden, besonders bei einer Verwendung von thermoplastischen Kunststoffen. Durch Variation einiger Prozessparameter kann eine Reduzierung der Maximaltemperatur erfolgen, wie bereits in Kapitel 4 mehrfach dargestellt wurde. Mit Hilfe des Simulationsergebnisses können alternative Bahnrouen herangezogen werden, um die Temperatur weiter zu senken. Beispielsweise kann im vorliegenden Fall eine Bewegung zum Ausgangspunkt stattfinden, bevor das Material erneut unter dem Plasmastrahl hindurchgeführt wird. Hierdurch würde sich die maximale Oberflächentemperatur deutlich verringern.

## 5.4 CAPM mit Maskierung

Für eine Metallisierung definierter Flächen wird eine Maskierung der Substratoberfläche benötigt. Für die vorliegende Simulation wird ein nichtrostender martensitischer Chrom-Stahl mit Molybdänzusatz (X39CrMo17-1) verwendet. Die Maske besitzt fünf

quadratische Ausschnitte mit einer Seitenlänge von 5 mm mit jeweils gleichen Abständen zueinander, wie Abbildung 81 dargestellt. Sowohl der Werkstoff als auch die Ausschnitte der Maske dienen rein zur Veranschaulichung der Simulation und liegen keinem bestimmten Anwendungsfall zugrunde.

Die Definition von Geometrie, Material und Vernetzung der Maske erfordert eine Änderung der Programmierung. Zuerst werden die äußeren Abmessungen der Edelstahlplatte festgelegt. Hierfür werden je zwei x-, y- und z-Koordinaten der Kanten des Werkstückes angegeben. Die Maske hat die gleichen Abmaße wie das Substrat in x- und y-Richtung, ist aber 1 mm stark.

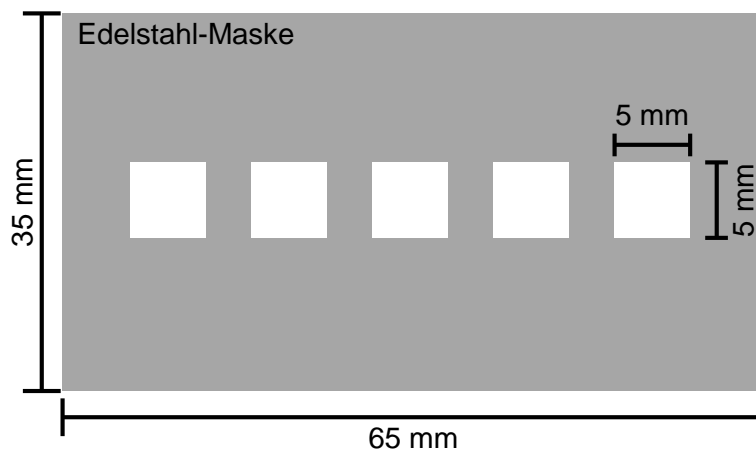


Abbildung 81: Schematische Darstellung der verwendeten Edelstahlmaskierung

Ein Unterschied zu der vorherigen Simulation stellt die Vernetzung dar. Aufgrund der zwei übereinanderliegenden Körper unterschiedlicher Geometrien wird ein anderer Befehl benutzt. Hierbei wird das Netz extrudiert und ein zusammenhängendes Netz entsteht. Es sind lediglich die Namen der zu vernetzenden Körper anzugeben, um alle Volumenkörper miteinander zu verbinden. Die Programmierung erfolgt analog zur einmaligen Metallisierungsüberfahrt. Wesentlich komplexer ist die Programmierung des Feldes. Im vorliegenden Fall erhitzt der Wärmestrom einerseits die Edelstahlmaste und andererseits an deren Öffnungen das Substrat. Folglich ist die Höhe, auf der das Array angewendet werden muss, in Abhängigkeit von der Position in x-Richtung anzupassen. Hierfür werden zuerst ein Analysetyp und die Umgebungstemperatur festgelegt. Daraufhin werden die Abmessungen der Aussparungen in x-Richtung, sowie die beiden Höhen der Masken- und der Substratoberfläche als Parameter nacheinander definiert. Mit Hilfe von Schleifen wird der Wärmestrom auf der Edelstahlmaste und auf dem Substrat aufgebracht. Hierbei werden die Endzeiten bzw. Abbruchbedingungen der Schleifen in Abhängigkeit der x-Koordinaten der Aussparungen programmiert. So wird bei der ersten Schleife die Höhe h1 (Maske) und die x-Koordinate bis zur ersten Aussparung angegeben. Bei der zweiten Schleife wird h2 (Substrat) und die x-Koordinaten vom Ende der ersten Schleife bis zum Ende der ersten Aussparung gewählt. Auf diese Weise wird das komplette

Werkstück mit Maske programmiert, was zu einem relativ hohen Programmieraufwand führt. Die geänderte Vernetzung führt zur Entstehung einiger Dreiecke. Der Grund dafür sind Aussparungen, welche durch ihre Position und Größe eine quaderförmige Vernetzung mit der Elementlänge 1 mm nicht zulassen.

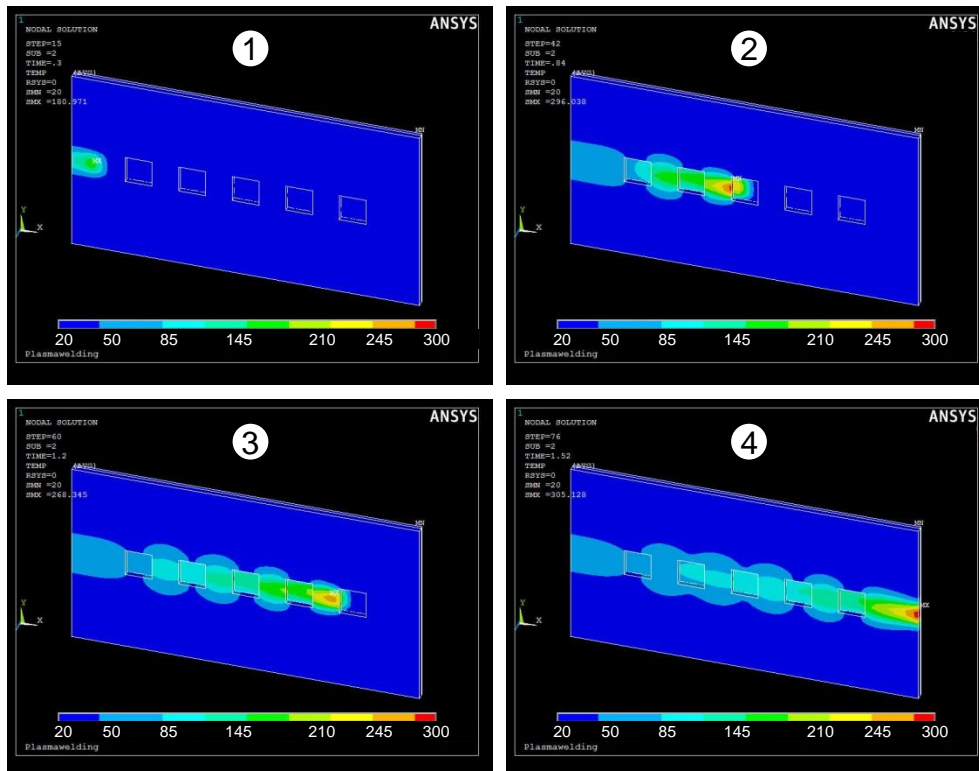


Abbildung 82: Simulationsverlauf einer einfachen Metallisierungsüberfahrt mit Maskierung

Der Simulationsverlauf unter Einsatz der Edelstahl-Maske ist in Abbildung 82 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Übertragungsfläche verengt, sobald eine Maskenöffnung erreicht wird. Dieses Muster ist auf die Position der Wärmequelle zurückzuführen, da diese teilweise über der Öffnung angeordnet ist und folglich die thermische Energie nur noch partiell auf die Maske übertragen wird. Dies äußert sich in einer ovalen Fläche zwischen den Öffnungen. Hierbei ist anzumerken, dass die Modellierung der Wärmequelle als zweidimensionaler Kreis die Wärmestrahlung an die Innenseiten der Aussparungen nicht berücksichtigt. Die Maximaltemperatur von 300 °C kann an den Kanten der Maskenöffnungen detektiert werden, was eine Folge der bereits erwähnten Energieübertragung in diesem Bereich darstellt. Die höhere Temperatur im Vergleich zum unmaskierten Simulationsverlauf kann auf die Materialeigenschaften des Edelstahls zurückgeführt werden. Wärmeübertragung zwischen Maske und Substrat sind in der vorliegenden Simulation aktuell noch nicht berücksichtigt. Die Anzahl der Elemente und Knoten haben sich infolge der Vernetzung der Edelstahlmaske verdoppelt, was den Hauptgrund der Simulationsproblematik darstellt. Im Folgenden werden anhand von Temperaturmessungen mit Hilfe des Laserpyrometers während einer einfachen CAPM-Beschichtungsüberfahrt die Ergebnisse der Simulation evaluiert.

## 5.5 Evaluierung der Simulationsergebnisse

Als Substratmaterial wird für die folgenden Untersuchungen ein thermoplastischer Kunststoff der Evonik AG namens VESTAMID HTplus M1033 mit 30% Glasfaseranteil eingesetzt. Er eignet sich durch die geringen Kosten und die geringe Wärmeleitfähigkeit sehr gut um den Temperaturverlauf zu analysieren. Die Verwendung von Keramiken oder Metallen ist bei höheren Prozessgeschwindigkeiten nicht sinnvoll, da die hohe Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe ein partielles Aufheizen reduziert. Zusätzlich bedingt eine höhere Prozessgeschwindigkeit eine geringe Menge an Messwerten. Alle Messungen werden mit identischen Probekörpern durchgeführt.

*Tabelle 11: Prozessparameter zur Evaluierung der Simulationsergebnisse*

Prozessparameter	Variationsbereich					
Abstand zur Düse in mm	4	6	8	10	12	14
Geschwindigkeit in mm/s	50					
Leistung in W	2000					
Gasflussrate in l/min	45					
Anzahl an Bahnen	1					
Prozessgas	N <sub>2</sub>					

Die Messdaten werden anhand der Prozessparameter in Tabelle 11 bestimmt. Es wird ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt, der für jede Faktorkombination drei Einzelversuche beinhaltet, um die Volatilität zu reduzieren. Anschließend werden jeweils Mittelwerte aus den Einzelmesswerten gebildet, welche in Tabelle 12 gelistet sind. Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen dieser Arbeit bezüglich der Abhängigkeit der Prozesstemperatur vom Abstand der Plasmadüse zur Substratoberfläche werden anhand von Tabelle 12 klar bestätigt. In Bezug auf die Simulationsergebnisse der vorherigen Kapitel ist allerdings ein deutlicher Unterschied der Prozesstemperaturen auszumachen.

*Tabelle 12: Messergebnisse auf Basis von Tabelle 11*

Abstand Geschw.	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	14 mm
50 mm/s	172,7 °C	160,9 °C	159,8 °C	156,9 °C	143,0 °C	136,6 °C

Der Grund liegt in der starken Vereinfachung der Simulation, welche keine Abstandsabhängigkeit der Wärmestromdichte beinhaltet. Eine Implementierung dieses Parameters ist in weiterführenden Arbeiten zwingend erforderlich, Somit kann die Verlustwärme, welche an die Umgebung, die Komponenten der Plasmadüse und an die Pulverpartikel übertragen wird, berücksichtigt werden. Die Berechnung der Temperaturverteilung und die entsprechenden Energieverluste im Plasmastrahl sind von mehreren Faktoren abhängig. Einige sind nachfolgend exemplarisch genannt:



- Prozessgas ( $N_2$ ,  $N_2H_2$ )
- spezifische Gaseigenschaften
- Gasflussrate
- Geometrie der Plasmadüse
- pulvermetallurgischen Eigenschaften des Beschichtungswerkstoffes
- Pulverdruck

Die Vielzahl an Einflüssen macht eine Berechnung der Verlustwärme sehr komplex und aufwändig. Folglich sollten mit Hilfe von praktischen Versuchsreihen Messdaten gesammelt werden, um die Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom jeweiligen Prozessparameter implementieren zu können. Neben der Laserpyrometermessung wird eine Temperaturnaheaufnahme mit Hilfe einer Wärmebildkamera empfohlen. Hiermit kann auch bei höheren Beschichtungsgeschwindigkeiten ein verlässlicher Messwert erzielt werden, was aufgrund der beschränkten Messfrequenz und der limitierten Reaktionszeit des Laserpyrometers nicht mehr sichergestellt werden kann.

In Abbildung 83 sind exemplarisch mehrere Temperaturverläufe in Abhängigkeit des Abstandes und der Gasflussrate dargestellt. [125] Eine Temperaturmessung im Plasmastrahl ergibt bei einem Gasfluss von 45 l/min und einem Abstand von 5 mm ca. 480 °C und bei einem Abstand von 10 mm ca. 350 °C. Des Weiteren ist Abbildung 83 zu entnehmen, dass die Temperatur bei zunehmender Reduzierung des Abstandes überproportional stark ansteigt. Bei 3,5 mm Abstand und 45 l/min sind es 600 °C. Bezugnehmend auf die Temperatur bei einem Abstand von 10 mm entspricht dies einer Steigerung von 71,43%. Da sich die vorliegenden Messungen in Abbildung 83 rein auf den Plasmastrahl ohne Metallpulverinjektion und ohne Kontakt zur Substratoberfläche beziehen, ist an der Substratoberfläche während des CAPM-Prozesses von einem stark reduzierten Temperaturmesswert auszugehen.

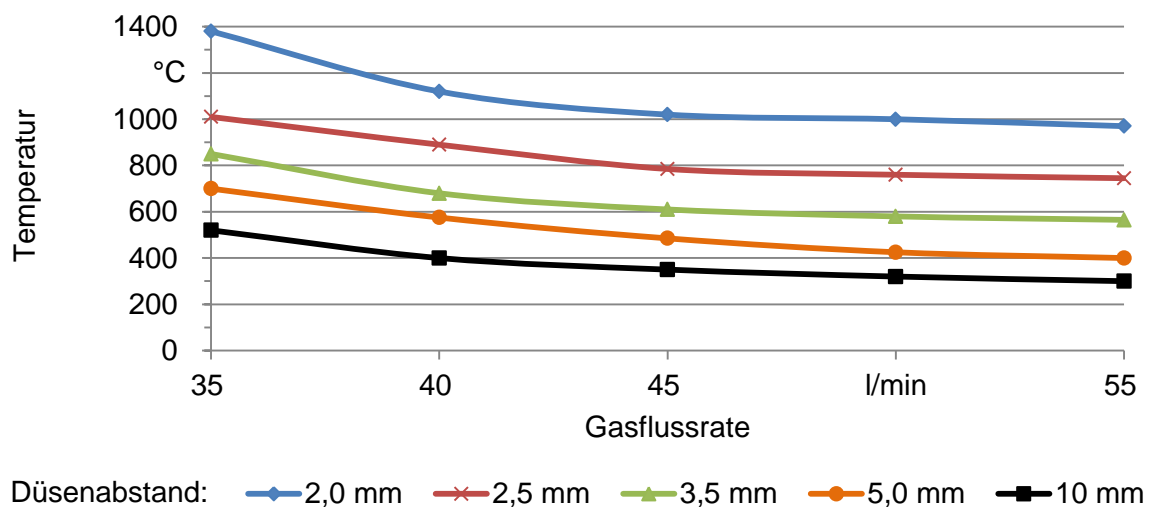


Abbildung 83: Temperaturverteilung im Plasmastrahl in Abhängigkeit vom Düsenabstand nach [125]

Zusammenfassend stellen die Simulationsergebnisse im vorangegangenen Kapitel eine erste Näherung an den tatsächlichen Prozess dar, bilden aber aufgrund der starken Vereinfachungen des realen CAPM-Prozesses noch keine verlässlichen Oberflächentemperaturen ab. Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse dieses Kapitels deutlich die Potentiale der Simulation in Verbindung mit dem CAPM-Verfahren auf. Hierbei wird erstmals eine thermische Simulation des Verfahrens entwickelt, um das Verhalten der Temperatúrausbreitung während des Beschichtungsprozesses für verschiedene Substratmaterialien vorhersagen zu können. Der modulare Aufbau ermöglicht eine schnelle und einfache Anpassung. Der Prozess wird im Zuge der Modellerstellung auf die wichtigsten Einflussgrößen abstrahiert, um ein adäquates Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei der Programmierung der Simulation zu erreichen. Mit den vorliegenden Ergebnissen konnten erste Erkenntnisse über das thermische Verhalten des Plasmabeschichtens gewonnen werden. Eine Verfeinerung bedingt die Implementierung weiterer praktischer Versuchsreihen, wodurch die Aussagekraft der Simulation erhöht und die Ergebnisse abgesichert werden können. Zusätzlich ist für eine ausgiebigere Untersuchung des CAPM-Verfahrens mit Hilfe der Simulation eine Weiterentwicklung hinsichtlich thermomechanischer Verformungs-Effekte sowohl innerhalb des Substratkörpers als auch in der entstehenden Metallschicht erforderlich. Hiermit kann der Prozess in Bezug auf das Materialverhalten, insbesondere das Versagen in Form von Brüchen und Delamination, besser prognostiziert werden. Weiterhin können Parameter, die aktuell statisch betrachtet (Konvektion, Werkstoffkennwerte) als dynamische Parameter realisiert werden.

## 6 Elektrische Kontaktierung der CAPM-Kupferstrukturen

In den Kapiteln 3 und 4 sind grundlegende Untersuchungen bezüglich der additiven Kupfermetallisierung verschiedener Substratmaterialien angeführt. Hierbei sind vor allem die Kenngrößen Haftzugfestigkeit, Schichtdicke, Porosität und die allgemeine Qualität der generierten Kupferstrukturen von entscheidender Bedeutung. Im diesem Kapitel wird der nächste Schritt der klassischen Prozesskette elektronischer Baugruppen, die AVT, näher betrachtet. Hierfür werden thermoplastische Kunststoffe nach den Erkenntnissen aus Kapitel 4.1 mit definierten Kupferstrukturen versehen. Anschließend werden sowohl Leitlebstoff als auch verschiedene Lotpasten verwendet, um herkömmliche passive elektronische Bauelemente der Bauform 1206 zu bestücken und elektrisch zu kontaktieren. In Abhängigkeit des verwendeten Verbindungsmediums erfolgt ein entsprechendes Aushärten bzw. ein herkömmlicher Lötprozess. Anschließend wird die Qualität der generierten Kupfermetallisierung der gefertigten Baugruppen evaluiert. Hierfür werden Haftzugfestigkeitsmessungen durchgeführt. Zusätzlich werden mit Scherversuchen geklebte bzw. gelötete Bauelemente von der CAPM-Kupferleiterbahn wieder entfernt und die hierfür notwendige Kraft detektiert. Die entstehenden Bruchstellen sollen Rückschlüsse auf die Qualität der Verbindung ermöglichen. Ferner werden an ausgewählten Proben metallographische Untersuchungen vorgenommen, um einen detaillierten Einblick in die Gefügestrukturen und Qualität der Verbindungsstellen zu erhalten. Abschließend stellt ein Vergleich zwischen Leitleben und Löten die jeweiligen Potentiale heraus. Die Ergebnisse stellen den nächsten Schritt im Entwicklungsprozess der CAPM-Technologie dar, indem sie aufzeigen, ob funktionstüchtige elektrische Baugruppen auf Basis einer CAPM hergestellt werden können. Gleichzeitig wird das Verhalten infolge thermischer Belastung während der Aushärte- bzw. Lötprozesses und dessen Einfluss auf die mechanische Festigkeit evaluiert.

Die Kupfermetallisierung erfolgt, ähnlich zu Kapitel 4.1, auf einem thermoplastischen Kunststoff. Das verwendete Polyamid (Ultramid TKR 4355 G5, BASF SE) [126] zeichnet sich durch eine sehr hohe Wärmeformbeständigkeit, Steifigkeit, Maßhaltigkeit und konstante mechanische Eigenschaften bei wechselnder Feuchtigkeitsbelastung aus. Folglich findet es vor allem im Automobilbau und allen Sektionen der Elektronik und der Energietechnik einen großen Einsatzbereich. Die vorliegende Formmasse basiert auf PA 6/6T und ist mit einem Glasfaseranteil von 25% versehen, wodurch der E-Modul erhöht und der thermische Längenausdehnungskoeffizient gesenkt wird. [127] Detaillierte Kenndaten sind Tabelle 13 zu entnehmen. Die Abmessungen der Substratkörper werden identisch zu denen aus Kapitel 4.1 gewählt. Des Weiteren ist in den folgenden Untersuchungen eine definierte Kupfermetallisierung mit einem entsprechenden Layout erforderlich. Hierfür wird, ausgehend von der Baugröße der elektronischen Bauelemente, eine Edelstahl-Maske konzipiert. Die Gestaltung des Layouts erfolgt nach den Vorgaben für oberflächenmontierte elektrische Schaltungen. [128; 129]

Tabelle 13: Ausgewählte spezifische Eigenschaften von Ultramid TKR 4355 G5 [126]

Schmelztemperatur in °C	295
max. Gebrauchstemperatur in °C	270
Zug-E-Modul in MPa	9000
Wärmeleitfähigkeit in W/mK	0,25
CTE längs/quer in ppm/K	25 / 50-60

Das Layout kann in drei unterschiedliche Bereiche unterteilt werden. Auf der rechten Hälfte werden mit Hilfe der Maskierung Leiterbahnen mit einer Breite von 500 µm aufgebracht. An den entsprechenden Kontaktpads werden Verbindungsmedium aufgebracht und SMD-Widerstände der Baugröße 1206 bestückt. Diese Strukturen werden anschließend einer Widerstandsmessung zur elektrischen und einem Scher-test zur mechanischen Charakterisierung der Verbindungsstelle unterzogen. Die linke Hälfte des Layouts ist wiederum in zwei Bereiche unterteilt. In beiden werden Kreise für die Haftzugfestigkeitsmessung aufgebracht. Oben mit einem Durchmesser von 5 mm für den Stirnabzugstest und unten mit einem Durchmesser von 1 mm für den sogenannten Hot-Pin-Pull-Test. [103; 104]

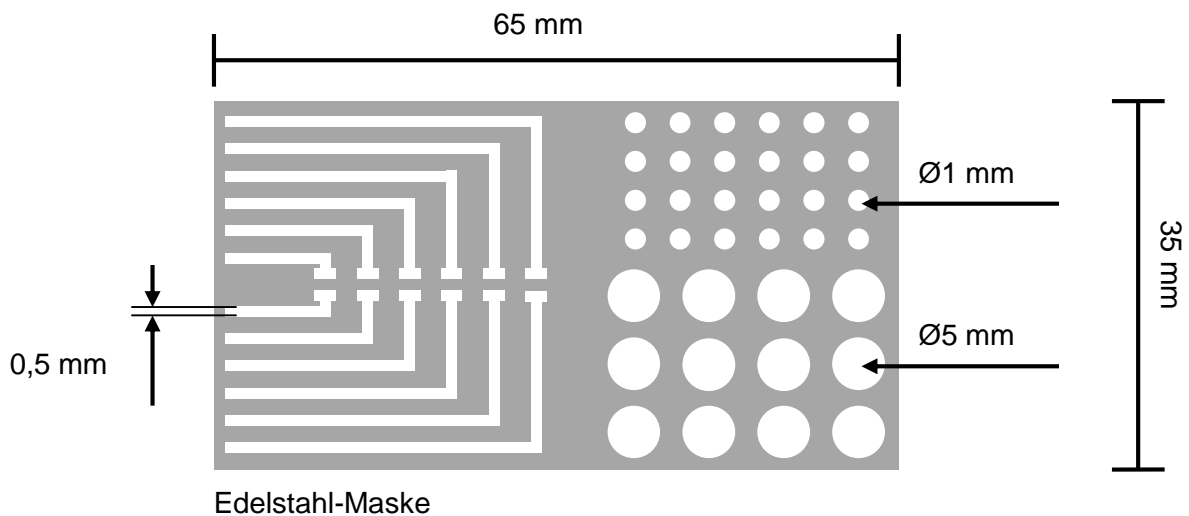


Abbildung 84: Schematische Darstellung der Edelstahl-Maske

Die Auswahl der Prozessparameter für die vollflächige maskierte Kupferbeschichtung basiert auf den Ergebnissen der Untersuchungen aus Kapitel 4. Die Prozessierung thermoplastischer Kunststoffe erfordert eine reduzierte thermische Belastung, weshalb sowohl ein größerer Abstand zwischen Plasmadüse und Substrat, als auch eine höhere Prozessgeschwindigkeit eingestellt werden. Aufgrund des direkten Kontakts zwischen Edelstahlmaske und Substrat findet infolge der vollflächigen Metallisierung eine zusätzliche Wärmeübertragung und somit thermische Belastung der Substratoberfläche statt, welche durch eine Verwendung von N<sub>2</sub> statt Formiergas als Prozessgas minimiert wird. Folglich ist auf Basis der genannten Prozessparameter für die Realisierung einer ausreichenden Cu-Schichtdicke die Bahnanzahl entsprechend

zu erhöhen. Tabelle 14 gibt einen Gesamtüberblick der verwendeten Prozessparameter.

*Tabelle 14: Prozessparameter für die vollflächige maskierte Kupferbeschichtung*

Prozessparameter	Wert
Gasflussrate in l/min	45
Pulverdruck in bar	1,5
Abstand Substrat zur Düse in mm	20
Anzahl an Bahnen	3
Geschwindigkeit in mm/s	120
Prozessgas in l/min	N <sub>2</sub>

Im Rahmen der Untersuchungen werden drei handelsübliche Verbindungsmedien verwendet, ein isotroper Leitklebstoff und zwei Lotpasten, eine niedrigschmelzende Lotpaste und ein Standardmaterial (siehe Tabelle 15). Mit dieser Auswahl wird ein Großteil aktueller Anwendungsgebiete abgedeckt. Das Applizieren erfolgt bei allen drei Verbindungsmedien mit einem Schraubendispenser. Die Bestückung der elektronischen Bauelemente erfolgt mit einem halbautomatischen System, was bei der vorliegenden Bauteilgröße in Verbindung mit dem einfachen Layout eine präzise Positionierung erlaubt.

*Tabelle 15: Übersicht über die verwendeten Verbindungsmedien*

Verbindungsmedium	max. Prozesstemperatur in °C	Prozesszeit in min
Leitkleber EPO-TEK H20E	150	5
Lotpaste Sn42Bi58 Typ 3	155	10
Lotpaste Sn96,5Ag3Cu0,5 Typ 3	230	10

Nach dem Applizieren des Verbindungsmediums und der Bestückung erfolgt das Aushärten des Leitklebstoffs bzw. das Löten. In Tabelle 15 sind die maximalen Prozesstemperaturen und -zeiten für jedes Medium angegeben. Das Aushärten erfolgt in einem herkömmlichen Trockenschrank unter N<sub>2</sub>-Atmosphäre, der Lötvorgang in der Dampfphase. Beide Umgebungen unterbinden eine mögliche Oxidation der freiliegenden Kupferbeschichtung und reduzieren somit den negativen Einfluss auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Baugruppen.

## 6.1 Charakterisierung der AVT auf Basis einer Kupfer-CAPM

Zu Beginn erfolgt die Bestimmung der Haftzugfestigkeit der generierten Kupferstrukturen, welche die Basis der Untersuchungen darstellt. Nur bei einer ausreichenden Metallisierungshaftung ist die Durchführung der AVT sinnvoll, da hiermit eine thermische Belastung erfolgt. Zusätzlich werden anhand der Messergebnisse und deren Vergleich mit den Resultaten der Schertests und der Schliffbilder wichtige Erkennt-

nisse über den Einfluss des Aushärte- bzw. Lötprozesses auf die Eigenschaften der CAPM gewonnen werden. Für die Untersuchungen werden sowohl der Stirnabzugstest, als auch der Hot-Pin-Pull-Test (HPP-Test) verwendet. Die verfahrenstechnischen Unterschiede beider Verfahren und deren Einfluss auf die Messergebnisse werden evaluiert. Im Gegensatz zum Stirnabzugstest werden beim HPP-Test Kupferstifte mit einem Durchmesser von 1 mm an Stelle von Metallstiften mit einem Durchmesser von 5 mm verwendet. Zudem erfolgt die Verbindung der Stifte mit der Metallisierung mit Hilfe von niedrigschmelzender Lotpaste des Typs Sn42Bi58 anstatt der Klebeverbindung beim Stirnabzugstest.

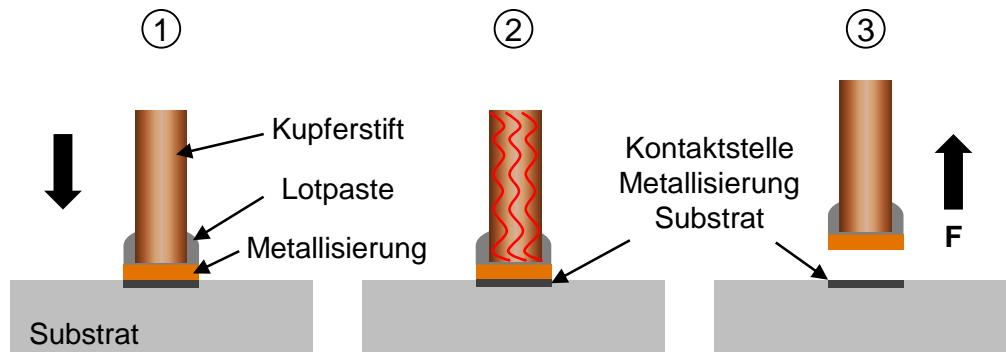


Abbildung 85: Schematische Darstellung der Prozesskette des Hot-Pin-Pull Verfahrens [103; 104]

Der prinzipielle Ablauf des Prüfverfahrens kann Abbildung 85 entnommen werden. Zuerst wird eine definierte Menge Lotpaste mit dem Schraubendispenser auf der Metallisierungsfläche aufgebracht bevor ein Kupferstift mit Hilfe einer hochpräzisen Positioniereinheit in das Lotdepot bzw. auf die Metallisierung abgesenkt wird (1). Der Stift selbst ist per Klemmung in einer Messdose fixiert. Als nächstes wird dem Liquiduspunkt der Lotpaste entsprechend ein programmiertes Temperaturprofil durchlaufen. Im Zuge dessen wird der Kupferstift im ersten Schritt erhitzt und der Temperatureintrag für die Benetzung der Komponenten Lotpaste, Kupferstift und Metallisierung genutzt, bevor eine Abkühlung per Konvektion erfolgt und der Verbund erkaltet (2). Abschließend wird der Kupferstift vertikal nach oben gezogen und die Kraft bis zum Versagen der Verbindung gemessen (3). Das Substrat ist während des kompletten Prozessablaufs auf dem Arbeitstisch der Anlage fixiert, um ein mögliches Verrutschen der Probe zu verhindern. [103; 104; 130]

An die Haftzugfestigkeitsuntersuchungen schließt sich die Bestimmung der Scherfestigkeit an. Hiermit werden Erkenntnisse über die Verbindung zwischen Substrat, Metallisierung, Lot und Bauelement bezüglich ihrer mechanischen Festigkeit gesammelt. Abhängig vom Bruchbild kann die schwächste Komponente des Verbundes eindeutig definiert werden und somit durch Anpassung der Prozessparameter eine Optimierung erreicht werden. Im Rahmen dieses zerstörenden Prüfverfahrens wird der Scherkopf mit einer konstanten Geschwindigkeit in horizontaler Richtung gegen die Kante des Bauelementes gefahren bis die Kontaktstelle nachgibt und das Bauelement vom Substrat abgeschert ist (siehe Abbildung 86).

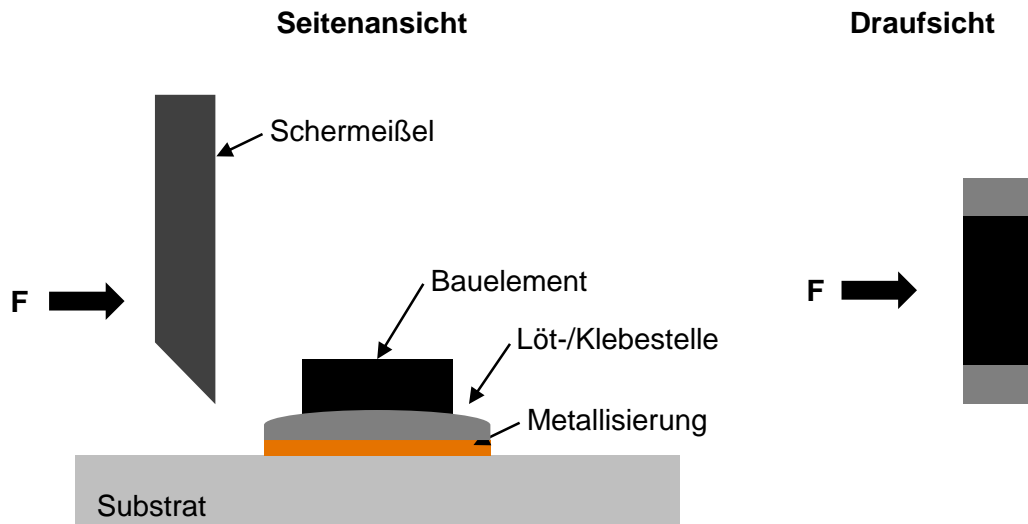


Abbildung 86: Schematische Darstellung des Scherversuchs [131; 132]

Das Versagenskriterium der Verbindung kann an dessen Bruchbild beurteilt werden, wobei nach

- Bruch des Bauelements (B)
- Versagen der Kontaktstelle Bauelement - Verbindungsmedium (BV)
- Bruch des Verbindungsmediums (V)
- Versagen der Kontaktstelle Metallisierung - Verbindungsmedium (MV)
- Delamination der Metallisierung (M)
- Ausbruch aus der Substratoberfläche (S)

klassifiziert wird. Die angeführten Bruchbilder werden sowohl für die Auswertung des Schertests, als auch für die Ergebnisse des Stirnabzugs- und HPP-Test, verwendet.

### 6.1.1 Bestimmen der Haftzugfestigkeit

Die Ergebnisse des Stirnabzugstests weisen eine große Streuung der Messwerte auf (siehe Abbildung 87). Es sind vier verschiedene Bruchcodes zu erkennen, die sich in ihrer Häufigkeit deutlich unterscheiden. Ein Bruch des Verbindungsmediums sowie ein Versagen der Kontaktstelle Metallisierung - Verbindungsmedium bilden den Großteil der Resultate. Das erst genannte Bruchbild ist auf ein Versagen der Klebeverbindung zwischen Metallstempel und Metallisierung zurückzuführen. Hierbei stellen, wie bereits in Kapitel 2.4.3 beschrieben, der hauptsächlich manuelle Prozess (Klebstoff dosieren und applizieren, Metallstempel positionieren und fixieren) und die raue Oberfläche der CAPM einen erheblichen Einfluss auf die Messwertbestimmung dar. Exemplarisch sind mögliche Folgen aufgeführt:

- Klebstoffreste verbleiben auf der Metallisierung;  
Ursache: mangelhafte Benetzung zwischen Metallstift und Klebstoff



- Partielles Ablösen der Metallisierung;  
Ursache: keine komplette Benetzung der Metallisierung oder schräge Positionierung des Metallstiftes
- Bruch in der Klebeverbindung  
Ursache: fehlerhaftes Aushärten

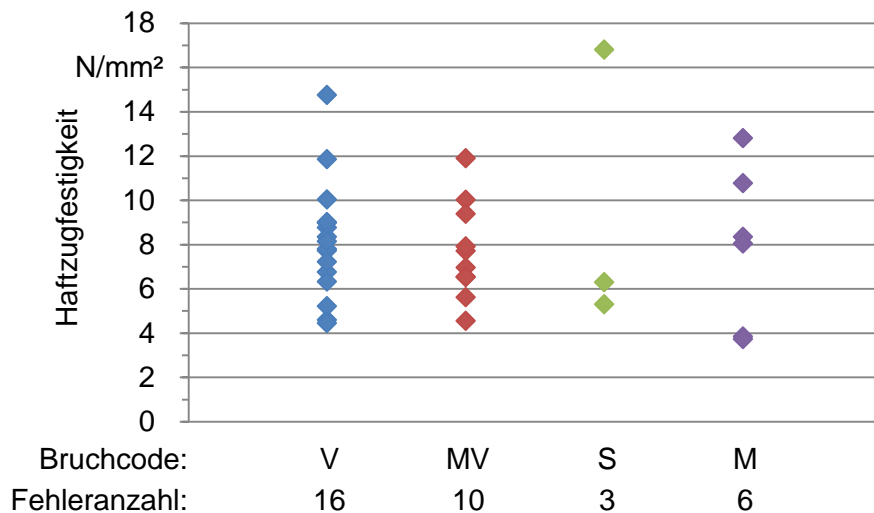


Abbildung 87: Ergebnisse des Stirnabzugstests in Abhängigkeit des Bruchbildes

Somit kann sowohl die hohe Streuung der Messwerte, als auch die Häufigkeit dieses Bruchbildes auf die Schwankungen des manuellen Versuchsaufbaus zurückgeführt werden. Eine Aussage über die Metallisierungsqualität kann infolge dieser Messwerte nicht getroffen werden. Ein Versagen der Kontaktstelle Metallisierung - Verbindungsmedium kann stets auf ein Ablösen des Klebstoffes inklusive Metallstempel von der Metallisierung zurückgeführt werden. Hierfür können ebenfalls mehrere Gründe angeführt werden (z. B. fehlerhaftes Applizieren des Klebstoffes, unzureichende Benetzung der Metallisierung). Allerdings ist beim Bruchbild MV im Vergleich zu V stets die komplette Menge des aufgetragenen Klebstoffes am Metallstift zu detektieren. Folglich liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die Haftung zwischen Metallisierung und Substrat größer ist als zwischen Metallisierung und Klebstoff, was bei den dargestellten Ergebnissen in Abbildung 87 hervorragende Haftzugfestigkeiten darstellt. Dieses Resultat ist jedoch mit dem Hintergrund der hohen Varianz der Messwerte und der Ähnlichkeit zu den Ergebnissen von V zu betrachten. Ein Ausbruch der Metallisierung zusammen mit Teilen der Substratoberfläche (S) liegt eindeutig in einem Übermaß an Klebstoff begründet. Hierdurch wird neben der Metallisierung auch die Substratoberfläche partiell abgezogen. Diese Ergebnisse können für die Bewertung der Haftzugfestigkeit nicht verwendet werden. Ein Abziehen der kompletten Metallisierung (M) stellt das gewünschte Ergebnis dar. Hierbei sind alle verfahrenstechnischen Vorgaben optimal umgesetzt. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch hier eine große Varianz. Im vorliegenden Fall kann dies eindeutig auf die schlechte Reproduzierbarkeit der verwendeten Anlagentechnik zurückgeführt werden, da sowohl die Substratmaterialien, die Prozessparameter für die Beschichtung

als auch die Prüfkriterien identisch sind. Unabhängig davon, zeigen die Ergebnisse eine ausreichende bis hervorragende Haftzugfestigkeit, die sich im Mittel mit  $7,91 \text{ N/mm}^2$  beziffern lässt.

Im direkten Vergleich zeigen die Ergebnisse des HPP-Tests ein komplett anderes Verhalten der Metallisierung (siehe Abbildung 88). Die erste wichtige Erkenntnis stellt die drastische Reduzierung des Bruchbildes V dar. Unter allen Messungen wurde hier nur ein Bruch des Verbindungsmediums detektiert.

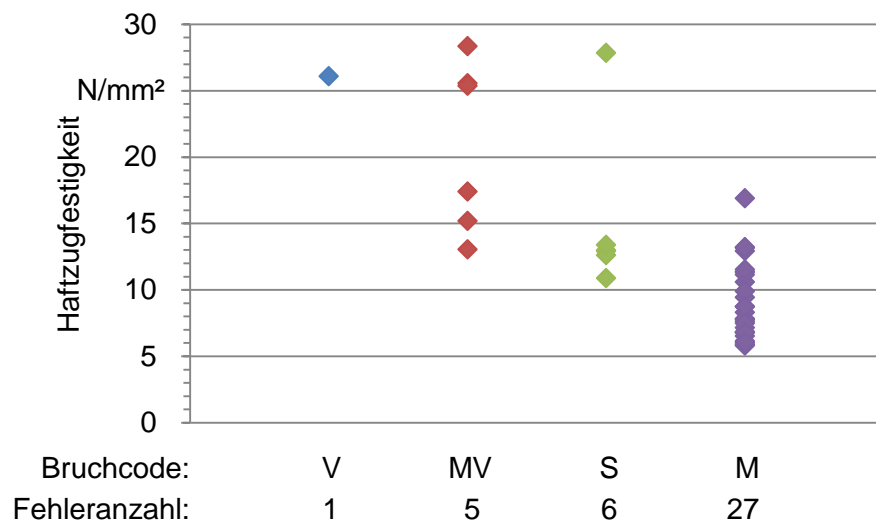


Abbildung 88: Ergebnisse des HPP-Tests in Abhängigkeit des Bruchbildes

Ein ähnliches Verhalten ist für das Versagen der Kontaktstelle Metallisierung - Verbindungsmedium auszumachen. Der Rückgang der Häufigkeit ist hierbei mit einer deutlichen Erhöhung der Messwerte verbunden, was auf eine bessere Benetzung und folglich höhere Haftzugfestigkeit der Lotpaste zurückzuführen ist. Hinzu kommt, dass eine Lötverbindung grundsätzlich eine höhere mechanische Festigkeit aufweist. Die Erklärung des Bruchbildes kann analog zum Stirnabzugstest erfolgen, allerdings mit dem großen Unterschied, dass bei den vorliegenden Messwerten, aufgrund des automatisierten Verfahrens, die Haftung zwischen Metallisierung und Substrat größer ist als die zwischen Metallisierung und Lotpaste.

Ausbrüche aus der Substratoberfläche können ebenfalls erkannt werden, welche beim HPP-Test durch ein fehlerhaftes Temperaturprofil bzw. eine Vorschädigung des Substrats zu erklären sind. Ersteres kann durch Übersteuern der Anlage auftreten und bedingt eine erhöhte thermische Belastung der Verbindung Substratoberfläche - Metallisierung. Eine Schädigung des Kunststoffgefüges erfolgt, welches anschließend zusammen mit der Metallisierung abgelöst wird. Der gleiche Effekt kann bei einer überhöhten Prozesstemperatur während der CAPM entstehen. Somit werden die Ergebnisse für S aus der Bewertung der Haftzugfestigkeit ausgenommen.

Der entscheidende Unterschied der beiden Testverfahren zeigt sich an der Häufigkeit des Bruchbildes M. Dieses kann beim HPP-Test am häufigsten detektiert werden und ermöglicht somit eine sehr gute quantitative Beurteilung der Haftzugfestigkeit.

Zusätzlich bewegen sich die Messwerte bis auf einige wenige Ausreißer in einem begrenzten Messbereich, was unter Berücksichtigung der schlechten Reproduzierbarkeit dennoch eine erste Aussage über die Haftzugfestigkeit zulässt. Zusammenfassend können beim HPP-Test die Messwerte des Bruchbildes M und MV für eine Bewertung herangezogen werden. Somit kann die Haftzugfestigkeit der vorliegenden Kupfermetallisierung im Mittel bei  $11,24 \text{ N/mm}^2$  detektiert werden. Im Vergleich zum Stirnabzugstest ist für zukünftige Untersuchungen der HPP-Test eindeutig zu bevorzugen. Die Vorteile hinsichtlich Handhabung, Zeitaufwand und Varianz der Ergebnisse können beim Stirnabzugstest nicht erzielt werden.

### 6.1.2 Bestimmen der Scherfestigkeit

Die Ergebnisse der Scherversuche sind quantitativ in Abbildung 89 und visualisiert in Abbildung 90 dargestellt. Der wichtigste Unterschied ist in der Ausprägung der Bruchbilder festzustellen. Zeigen sich bei den Proben mit Leitleber eine Mischung aus Bruch des Verbindungsmediums (V) und Versagen der Kontaktstelle Bauelement - Verbindungsmedium (BV), so sind bei den gelöteten Baugruppen ausschließlich eine Delamination der Metallisierung zu erkennen.

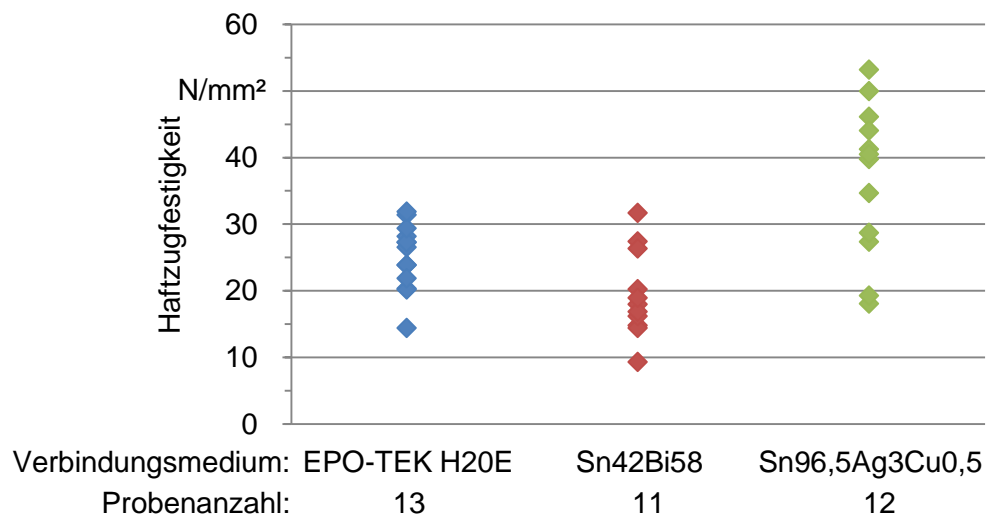


Abbildung 89: Ergebnisse der Schertestuntersuchungen in Abhängigkeit des Verbindungsmediums

Mit Hilfe der jeweiligen Messwerte können folgende Erkenntnisse getroffen werden. Die Scherfestigkeit der vorliegenden leitgeklebten Proben unterscheidet sich kaum von den gelöteten Proben, welche mit niedrigschmelzendem Lot aufgebaut wurden. Im Vergleich dazu sind für die Baugruppen auf Basis von Sn96,5Ag3Cu0,5 höhere Scherfestigkeiten zu detektieren. Aufgrund des identischen Bruchbildes der gelöteten Proben, unabhängig von der verwendeten Lotpaste, kann nur die erhöhte thermische Energie während des Lötprozesses als Begründung für die bessere Scherfestigkeit herangezogen werden. Die Vernetzung der Lotpaste mit der Kupfermetallisierung ist bei beiden Lotpasten identisch, da sich keine Unterschiede in den Bruchbildern zeigen. Folglich liegt die erhöhte Scherfestigkeit in der Kontaktstelle Metallisierung -

Substratoberfläche begründet. Die identische Probenherstellung legt die Annahme nahe, dass infolge der erhöhten thermischen Belastung während des Lötprozesses eine Nachvernetzung zwischen Substrat und Metallisierung stattfindet, welche direkten Einfluss auf die Scherfestigkeit hat. Eine partielle Erweichung des thermoplastischen Materials an der Kontaktstelle begünstigt den verbesserten Formschluss zwischen den Kupferstrukturen und der Substratoberfläche.

Bei den Proben mit niedrigschmelzender Lotpaste findet dieser Effekt aufgrund der geringeren Löttemperatur von 155 °C nicht statt. Gleiches gilt für die leitgeklebten Baugruppen. Vor allem letztere zeigen, bezugnehmend auf die Bruchbilder in Abbildung 90, ein komplett unterschiedliches Verhalten.



*Abbildung 90: Exemplarische Darstellung der Bruchbilder der Scherversuche*

Neben den dargestellten Versagensfällen konnten bis auf einen Bruch des Bauelementes alle oben angeführten Bruchbilder detektiert werden. Mögliche Gründe hierfür können im Auftrag des Leitklebers und der halbautomatischen Bestückung sowie der Vernetzung von Leitklebstoff mit Bauelement bzw. Metallisierung gesehen werden. Da Leitkleber im Gegensatz zu Lotpaste keinen Liquiduszustand und folglich keine benetzende Eigenschaft aufweist, ist die vollflächige Benetzung des Kontaktpads entscheidend vom Applizieren abhängig. Es ist hilfreich mehrere kleinere Dots über das Kontaktpad zu verteilen, um beim Bestücken eine vollflächige Benetzung sowohl des Bauelementes, als auch der Metallisierung, zu ermöglichen. Des Weiteren können durch Verwendung der halbautomatischen Bestückung beispielsweise ein Versatz oder eine ungleichmäßige Krafteinwirkung vorliegen, welche die Scherfestigkeit negativ beeinflussen. Die Verbindung zwischen verzinnnten Bauelementen und silberhaltigen Leitklebern wird als kritisch angesehen, weshalb spezielle Leitklebstoffe für einen Einsatz in Verbindung mit nicht edlen Metallen am Markt verfügbar sind. [133] Als weiterer Punkt ist die Oxidation der Kupferstrukturen anzuführen, welche eine differenzierte Betrachtung bedarf. Bei einer Verwendung von Lotpaste ist hier aufgrund des Flussmittelanteils kein Einfluss zu erkennen. Die Haftung leitgeklebter Bauelemente kann jedoch beeinflusst werden. Folglich wird angeraten, zukünftig mit einer Passivierung der Kupferstrukturen zu arbeiten. Diese kann leicht, beispielsweise auf Zinnbasis, mit der vorliegenden CAPM-Anlagentechnik realisiert

werden. Eine detaillierte Betrachtung erfolgt zum Ende dieses Kapitels. Abschließend ist zu erkennen, dass die in Abbildung 90 dargestellten Kupferpadabmessungen von den Vorgaben laut [129] teilweise deutlich abweichen. Dieser Effekt kann sowohl auf die Fertigungstoleranz der Edelstahlmasken von  $\pm 0,1$  mm zurückgeführt werden, als auch mit der Verbindung von Maske und Substrat zusammenhängen. Beide werden mit zwei Metallklammern den Stirnkanten verbunden, sodass eine Ausdehnung der Maske im Zuge der Erwärmung während des Beschichtungsprozesses nicht kompensiert werden kann. Folglich können partielle Abhebungen der Maske entstehen, die zu einem ungenauen Abbild der Maskengeometrie auf die Substratoberfläche führen. Abschließend ist festzuhalten, dass eine mechanische Verbindung mit ausreichender Scherfestigkeit zwischen der Cu-CAPM und allen verwendeten Verbindungsmedien realisiert werden konnte. Im Vergleich zu herkömmlichen Baugruppen auf Basis von FR4-Leiterplatten mit entsprechender CuNiAu-Metallisierung sind allerdings geringere Messwerte zu erkennen. Eine gezielte Optimierung der einzelnen Prozesse der AVT speziell für CAPM-Strukturen, eine Reduzierung der Rauheit der Metallisierung, eine Passivierung der Kupferstrukturen und eine Auswahl des geeigneten Verbindungsmedium stellt jedoch ein enormes Verbesserungspotential dar.

### 6.1.3 Metallographische Untersuchungen

Für eine mikroskopische Betrachtung des Verbundes aus Kunststoffsubstrat, Kupfermetallisierung, Verbindungsmedium und elektronischem Bauelement ist ein Schnitt durch alle Komponenten in der Mitte der passiven Komponente erforderlich. Das Ziel der Untersuchungen ist den Zusammenhang zwischen der Ausprägung von Scherkräften und dem Aufbau des Materialverbundes zu erarbeiten. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können nachfolgend die Herstellungsprozesse optimiert bzw. die Wahl der richtigen Komponenten definiert werden. Die Auswertung der Schliffbilder zeigt eine qualitativ hochwertige Verbindung zwischen Metallisierung, Lotpaste und Bauelement, unabhängig von der verwendeten Lotpaste (siehe Abbildung 91). Es ist ein gleichmäßiger Lötmeniskus ausgebildet, welcher nur selten Lunker aufweist. Des Weiteren bildet das Lot sowohl eine ideale Bindung zum Bauelement, als auch eine formschlüssige Verbindung mit der Cu-CAPM aus. In der Vergrößerung der Kontaktstelle zwischen Substratoberfläche, Kupfermetallisierung und Lotpaste ist die stärkere Vernetzung des SnAgCu-Lotes eindeutig zu erkennen. Folglich kann die Annahme der größeren Scherfestigkeit aufgrund der höheren thermischen Belastung bestätigt werden. Grundlegend belegen die Schliffbilder die guten Ergebnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen. Der direkte Vergleich mit den leitgeklebten Baugruppen zeigt ein vollkommen anderes Ergebnis. Die Benetzung des Bauelements ist gering bis kaum ausgebildet (siehe Abbildung 92). Zudem ist eine erhöhte Lunkerbildung im Leitkleber zu erkennen. Einzig die Kontaktstelle zwischen Substrat, Metallisierung und Leitkleber zeigt eine vergleichbare Ausprägung zu den gelöteten Proben. Die Schliffbilder in Abbildung 92 spiegeln somit ebenfalls die Ergebnisse aus den Scheruntersuchungen wieder. Die geringe Benet-



zungsfläche zwischen Bauelement und Leitklebstoff bedingt die niedrigen Scherfestigkeiten und die Häufigkeit der Bruchbilder V und MV.

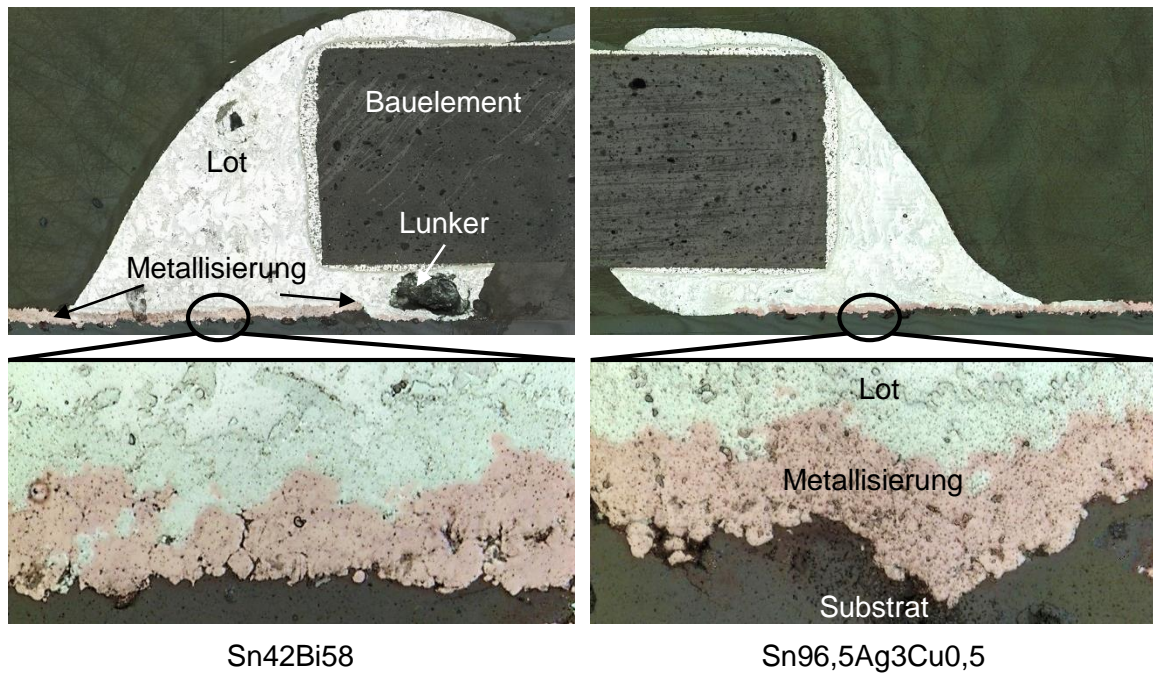


Abbildung 91: Schliffbilder zweier Lötstellen differenziert nach der verwendeten Lotpaste

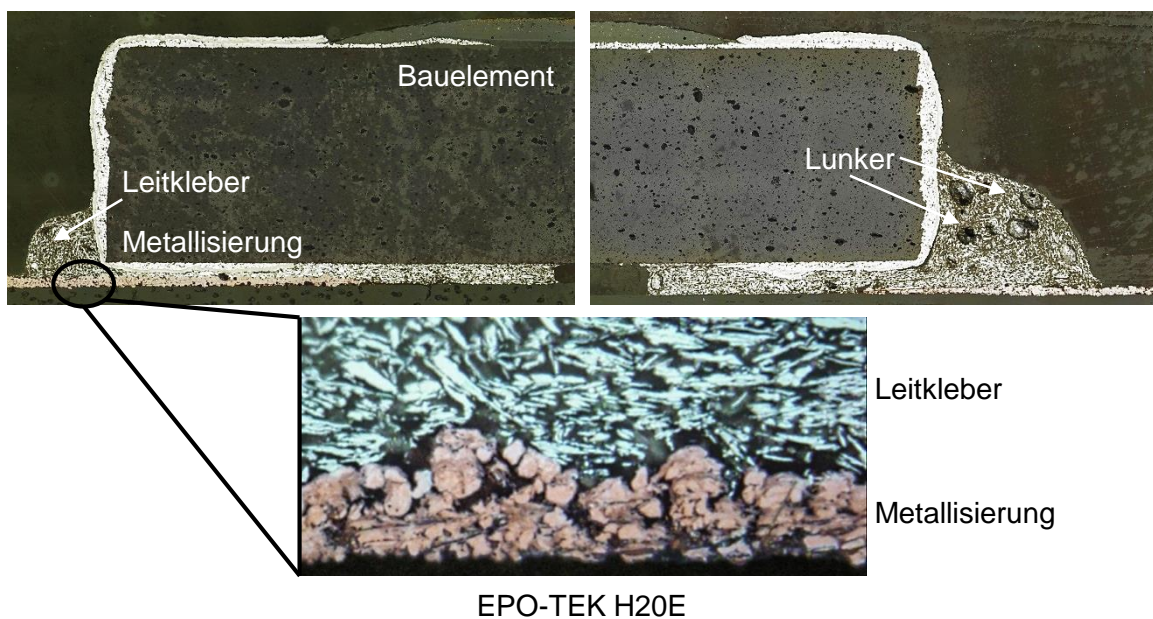


Abbildung 92: Schliffbilder zweier Leitklebestellen

Zusätzlich ist zu erkennen, dass das Verbindungsmedium zu einem großen Teil unter dem Bauelement vorhanden ist. Vor allem der Unterschied in den aufgetragenen Mengen an Leitkleber ist deutlich zu erkennen. Folglich findet eine Klebewirkung zwischen Substratoberfläche und Bauelement statt, welche das Ergebnis des Scherversuchs beeinträchtigt.

Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen zeigen eine hervorragende Vernetzung zwischen der Cu-CAPM und dem jeweiligen Verbindungsmedium. Die unterschiedliche Ausprägung der Scherfestigkeit kann anhand der Schliffbilder belegt werden. Zusätzlich können die Hauptgründe für die Ausbildung und Häufigkeit der verschiedenen Bruchbilder dargelegt werden.

## 6.2 Mögliche Passivierung einer Kupfer-CAPM

Wie bereits in den Untersuchungen aus Kapitel 4 deutlich herausgearbeitet werden konnte, ist eine Passivierung der Cu-CAPM nach dem Beschichtungsprozess zwingend notwendig, um Oxidation zu vermeiden. Hierfür kommen verschiedene Lösungskonzepte in Frage, von denen drei ausgewählte Möglichkeiten im Folgenden diskutiert werden. Das übergeordnete Ziel dieses Kapitels ist die Integration eines Passivierungsschrittes entweder direkt in die CAPM-Prozesskette oder den Beschichtungsprozess nachfolgend ohne Einschränkungen in der Funktionalität und Anwendungsvielfalt des Verfahrens vornehmen zu müssen.

Die Auswahl eines geeigneten Passivierungsverfahrens wird auf Basis der in Kapitel 2.4 angeführten potentiellen Einsatzgebiete der CAPM-Technologie durchgeführt. Baugruppen der MID-Technik und der Leistungselektronik weisen stets einen Schutz der leitenden Kupferstrukturen auf. Um eine Vergleichbarkeit mit herkömmlichen Fertigungstechnologien zu ermöglichen und somit eine Standortbestimmung des CAPM-Verfahrens durchzuführen, ist es sinnvoll, gleiche bzw. artverwandte Verfahren zu verwenden. Folgende drei Verfahren werden hinsichtlich ihrer Anforderungen, Anwendbarkeit und dem verbundenen Aufwand diskutiert:

- chemische bzw. galvanische Abscheidung einer Passivierungsschicht
- Lackieren der Kupfer-CAPM
- Passivieren mit dem CAPM-Verfahren

Die chemische bzw. galvanische Metallisierung stellt das Hauptverfahren für die Passivierung von leitenden Kupferstrukturen dar. Sowohl in der klassischen Leiterplattenfertigung, als auch in der Leistungselektronik oder der MID-Technik erfolgt eine Abscheidung verschiedener Metallschichten zum Schutz vor Oxidation. Klassisch werden CuNiAu, CuAg oder CuSn als Metallverbund abgeschieden, welche je nach Anwendungsgebiet, Aufwand und Kosten ihre spezifischen Vorteile bieten. Eine NiAu-Beschichtung ist vor allem in der Leiterplattenfertigung und der MID-Technik üblich. Ni bildet hier die Diffusionsbarriere zwischen der Kupfermetallisierung und dem Goldflash, welches die Lagerfähigkeit und die Benetzung mit einem Verbindungsmedium begünstigt. Aufgrund des zweistufigen Prozesses und der Kosten wird eine einfache Silbermetallisierung immer interessanter. Hierbei ist jedoch die starke Wechselwirkung von Ag mit Schwefelwasserstoffen zu beachten, die eine Bildung von Silbersulfid bedingen. Die Folge sind Korrosion, Ausfall der Leitfähigkeit und Bruch der Kontaktstellen. Die einfache Zinnmetallisierung stellt die kostengünstigste Lösung dar, ist aber aufgrund des geringen Schmelzpunktes (ca.

232 °C) in seinen Anwendungsfeldern limitiert. Obwohl vielfältige Passivierungsmöglichkeiten bestehen und die chemische bzw. galvanische Metallisierung seit Jahrzehnten zu den Standardverfahren zählen ist ein Einsatz in Kombination mit der CAPM-Technologie nicht sinnvoll. Gerade der Vorteil der Substitution chemischer und galvanischer Prozesse zählt zu den Hauptvorteilen der CAPM-Technologie. Zusätzlich wird die Prozesskette infolge zahlreicher Aufbereitungs-, Reinigungs- und Metallisierungsschritte deutlich verlängert, was neben dem erheblichen Anlageninvestition als weiteres Ausschlusskriterium zu nennen ist. Nichtsdestotrotz ist eine chemische bzw. galvanische Metallisierung der Cu-CAPM möglich. Aus wirtschaftlicher und technologischer Sicht ist eine Verwendung nur bei bereits vorhandener Anlagentechnik und keiner weiteren anforderungsbedingten Passivierungsalternative zu empfehlen.

Lackieren wird hauptsächlich zum Schutz gegen Feuchtigkeit, Emissionen nachfolgender Fertigungsprozesse oder als abschließende Schutzschicht eingesetzt. Die vielfältige Auswahl an Lacken ermöglicht eine Verwendung in zahlreichen Anwendungsbereichen. Die individuelle Mischung der einzelnen Komponenten erlaubt eine spezielle Anpassung der Lackeigenschaften an das spezifische Anforderungsprofil des jeweiligen Einsatzgebietes. Des Weiteren sind die Kosten und der Aufwand im Vergleich zur chemischen oder galvanischen Metallisierung wesentlich geringer. Lackieren ist ein Standardprozess, kann vollautomatisiert und in hohen Stückzahlen durchgeführt werden. Die notwendige Anlagentechnik beschränkt sich auf eine gekapselte Prozesseinheit und entsprechendes Handhabungssystem. Eine Verwendung für die Passivierung von CAPM-Kupferstrukturen ist differenziert zu betrachten. Einerseits stellt das Lackieren ein einfaches, kostengünstiges, unkompliziertes und schnelles Verfahren dar, welches mit einigen Anpassungen auch in die CAPM-Prozesszelle integrierbar ist. Hiermit kann eine Passivierung direkt auf die Beschichtung erfolgen, was in Kombination mit einer entsprechenden Schutzgasatmosphäre die Oxidation vollkommen vermeiden würde. Auch im zeitlichen Hinblick wird die Prozesskette nur marginal verlängert. Zusätzlich sind neben einer Integration in die CAPM-Prozesszelle weitere Anlagenkonzepte möglich, die beispielweise ein Lackieren und Aushärten im Nutzen ermöglichen. Neben den zahlreichen Vorteilen sind jedoch auch einige Nachteile anzuführen. Eine vollflächige Lackierung unterbindet eine elektrische Kontaktierung der Kupferstrukturen. In der Folge muss entweder strukturierte Lackierung oder eine Maskierung der späteren Kontaktstellen erfolgen. Beide Vorgehen sind mit einem entsprechenden Aufwand verbunden. Ersteres bedingt eine deutliche Verlängerung der Prozesszeiten im Vergleich zu einer vollflächigen Lackierung während bei letzterem jeweils spezifische Masken erforderlich sind, welche einen zusätzlichen Kostenaufwand und eine Reduzierung der Prozessflexibilität bedeuten.

Mit dem CAPM-Verfahren können neben Cu auch zahlreiche weitere Metalle abgeschieden werden. So können beispielweise unter Einsatz von Ni-, Ag-, und Sn-Pulver die gleichen Beschichtungen aufgebracht werden, wie mit der chemischen



bzw. galvanischen Metallisierung. Hierbei sind in gesundheitlicher und wirtschaftlicher Hinsicht klare Nachteile zu erkennen. So ist eine Verwendung von Ni-Pulver aus monetärer und technologischer Sicht durchaus vorstellbar, hinsichtlich gesundheitlicher Schutzeinrichtungen sind jedoch erhebliche Maßnahmen zu treffen, da Ni das Krebsrisiko in den Atemorganen stark erhöhen kann. Folglich ist ein Einsatz von Ni-Pulver mit einer Kontamination der entsprechenden Prozesszelle verbunden, was ein separates Anlagensystem erforderlich macht. Im Gegensatz dazu ist Ag-Pulver vom gesundheitlichen Aspekt aus wesentlich weniger bedenklich, allerdings in wirtschaftlicher Hinsicht nur in Verbindung mit einer entsprechend leistungsfähigen Absaugung und einem Rückgewinnungssystem des restlichen Pulvers realistisch. Eine Verwendung von Sn bietet hingegen viele Vorteile. Das Metallpulver kann kostengünstig bezogen und aufgrund seines niedrigen Schmelzpunktes einfach verarbeitet werden. Zudem ist die Integration einer zweiten Plasmadüse für die Zinnbeschichtung in die CAPM-Prozesszelle ohne Einschränkungen möglich. Eine entsprechende Programmanpassung des Handhabungssystems und der CAPM-Anlage ermöglicht eine sequentielle Beschichtung mit Cu und Sn. Nachteilig sind in diesem Zusammenhang die gleichen Punkte wie bei der Lackierung anzuführen, was die Anwendungsflexibilität etwas einschränkt. Technologisch und wirtschaftlich stellt diese Passivierungsmöglichkeit die beste Wahl dar.

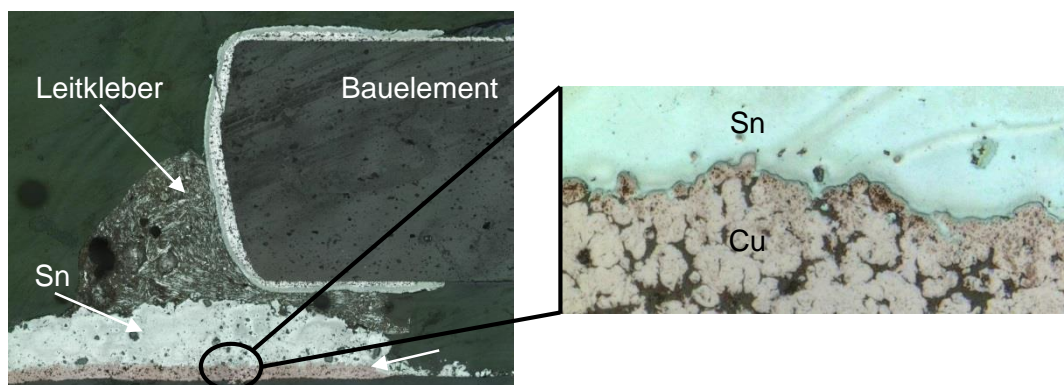
Nachfolgend sind die Ergebnisse erster Voruntersuchungen der Zinnpassivierung mit dem CAPM-Verfahren angeführt. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die verwendeten Prozessparameter. Ausgehend von den bisherigen Ergebnissen dieser Arbeit wird eine Reduzierung der Prozessgeschwindigkeit vorgenommen, um eine ausreichend hohe Schichtdicke zu realisieren und somit ein mediendichtes Kapseln der Kupferstrukturen zu ermöglichen. Die Zinnbeschichtung erfolgt auf den vorliegenden Proben der vorangegangenen Versuche, welche nach den Parametern in Tabelle 14 prozessiert wurden.

*Tabelle 16: Prozessparameter für die Zinnmetallisierung*

Prozessparameter	Wert
Gasfluss in l/min	45
Pulverdruck in bar	1,5
Abstand Substrat zur Düse in mm	20
Anzahl an Bahnen	3
Geschwindigkeit in mm/s	80
Prozessgas in l/min	N <sub>2</sub>

Die Zinnbeschichtung zeigt sehr gute Ergebnisse (siehe Abbildung 93). Die aufgebrauchte Schicht weist eine ausreichende Schichtdicke verbunden mit einer sehr niedrigen Porosität auf. In der Vergrößerung ist zudem eine sehr gute Vernetzung der Zinnschicht mit der Kupferstruktur zu erkennen, welche auf eine gute Haftzugfestigkeit zwischen den beiden Metallschichten schließen lässt.

Ein erster Durchlauf der AVT auf Basis des vorliegenden Leitklebstoffes zeigt ebenfalls ein gutes Benetzungsverhalten zwischen den Komponenten. Somit ist die Zinnbeschichtung unter Verwendung der CAPM-Technologie einer chemischen bzw. galvanischen Metallisierung oder einer Lackierung zum Oxidationsschutz der Kupferstrukturen eindeutig vorzuziehen. Die genannten Vorteile in Verbindung mit den ersten Ergebnissen zeigen ein enormes Potential, welches durch eine entsprechende Optimierung der Prozessparameter ausgeschöpft werden kann. Exemplarisch kann eine geringere Schichtdicke durch eine Reduzierung der Bahnanzahl erreicht werden, da Sn aufgrund seiner niedrigen Schmelztemperatur von 232 °C sehr einfach mit der CAPM-Verfahren aufgeschmolzen werden kann. Dies führt bei den verwendeten Prozessparametern im Vergleich zu Cu zu einer deutlich höheren Abscheiderate (siehe Abbildung 93).



*Abbildung 93: Schliffbild einer Zinnpassivierung mittels CAPM auf Basis einer Kupfer-CAPM*

Als Resultat kann zusammenfassend festgehalten werden, dass auf Basis einer strukturierten Cu-CAPM herkömmliche Verbindungstechnologien der Elektronikproduktion eingesetzt werden können, um elektronische Baugruppen zu realisieren. Zusätzlich bietet das CAPM-Verfahren die Möglichkeit, in einem integrierten Prozessschritt eine Passivierung der generierten Kupferstrukturen mit Sn vorzunehmen, was eine erhebliche Erweiterung des Anwendungspotentials darstellt.

## 7 Zusammenfassung

Auf Basis von Kunststoff- oder Keramikwerkstoffen zählen die additiven Fertigungstechnologien im industriellen Umfeld, speziell im Bereich Rapid Prototyping, aber auch zunehmend in der Herstellung von Grundkörpern, zum Stand der Technik. Unter Betrachtung der stetig wachsenden Innovationsdynamik wird eine zunehmende Kostensenkung in Kombination mit einer steigenden Integrationsdichte gefordert. Strukturierte additive Metallisierungsverfahren, insbesondere Plasmatechnologien, stellen in diesem Zusammenhang eine sinnvolle Erweiterung der aktuellen Herstellungsverfahren dar und bieten gleichzeitig ein enormes Anwendungspotential für die Entwicklung innovativer Produkte. Vor allem das CAPM-Verfahren findet aufgrund seiner kurzen Prozesskette, der hohen Flexibilität und der fast uneingeschränkten Materialauswahl sowohl potentielle Einsatzgebiete in der MID-Technik, als auch in der Leistungselektronik. Die Konzeption und der Aufbau einer CAPM-Prozesszelle, die grundlegende Qualifizierung mittels CAPM-Technologie generierter Kupferschichten auf Basis verschiedener Substratwerkstoffe hinsichtlich Haftzugfestigkeit, Schichtdicke, Porosität und Stromtragfähigkeit, die Erstellung eines ersten thermischen Simulationsmodells und eine erste Betrachtung der AVT auf Basis von CAPM-Strukturen stellen die wichtigsten Aspekte dieser Arbeit dar.

Die Konzeption und Umsetzung einer CAPM-Prozesszelle erfordert vorab eine grundlegende Klärung der Handhabung der Substratmaterialien, welche abhängig von Anwendungsbereich und Stückzahl differiert, um eine kosten- und prozesseffiziente Anlagenkonfiguration zu ermöglichen. Darauf aufbauend wird ein den Vorgaben entsprechendes Robotersystem integriert, welches gleichzeitig die zentrale Steuereinheit der gesamten Prozesszelle darstellt. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen eine Prozesszelle, die sich durch eine hohe Flexibilität in Bezug auf variierende Substratmaterialien und Bearbeitungsabläufe auszeichnet. Zudem wird eine Basisperipherie vorgestellt, die für einen wissenschaftlichen Einsatz im Sinne der Materialqualifizierung zwingend erforderlich ist. Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf den Einsatz der CAPM-Technologie in der Serienfertigung zeigt weitere Anlagenkonfigurationsmöglichkeiten auf, stellt erforderliche Sicherheitssysteme dar und bildet somit eine Auswahl an Optimierungspotentialen ab.

Die Charakterisierung und Prozessoptimierung der CAPM auf Basis verschiedener Substratmaterialien (Kunststoff, FVK, Keramik, Si-Wafer) zeigt die Potentiale der Plasmatechnologie auf und bildet gleichzeitig die Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bezüglich strukturierter additiver Metallisierung. Die enorme Vielfalt an Prozessparametervariationsmöglichkeiten und insbesondere der Einfluss der einzelnen Prozessparameter auf die Haftzugfestigkeit, Schichtdicke, Porosität und Stromtragfähigkeit sowie die Wechselwirkung zwischen den Prozessparametern selbst bilden die Grundlage für ein umfassendes Prozessverständnis der CAPM. Die Arbeit zeigt grundlegende Betrachtungen ausgewählter Prozessparameter, deren Einfluss auf die genannten Qualitätskenngrößen und Empfeh-

lungen für entsprechende Parameterkombinationen abhängig von den jeweiligen Anforderungen. Die Aufbereitung der erzielten Ergebnisse mit Hilfe eines entsprechenden Prozessmodells und die grafische Darstellung der Prozessparameterabhängigkeiten stellen zusammenfassend die wichtigsten Erkenntnisse dar. Eine Verknüpfung der praktisch erzielten Erkenntnisse mit allgemeingültigen mathematischen und physikalischen Gleichungen sowie chemischen Analysen erlaubt eine detailliertere Betrachtung des Beschichtungsprozesses und kann folglich die Definition materialspezifischer Prozessparameter deutlich beschleunigen.

Ein weiterer Fokus der Arbeit war die erstmalige Definition eines vereinfachten thermischen Simulationsmodells, um den Einfluss von Prozessparametervariationen auf die Eigenschaften der generierten Schichtstrukturen schnell und kosteneffizient abzubilden. Hierbei wird die Temperaturverteilung im Substratmaterial während des Beschichtungsprozesses grafisch dargestellt. Das Modell erlaubt eine Variation des Substratmaterials, der Wärmeeinflusszone, der Prozessgeschwindigkeit, der Wärmestromdichte und des Abstands zwischen Substratoberfläche und Plasmadüse. Mit dieser ersten Auswahl konnten Erkenntnisse auf Basis verschiedener Beschichtungsabläufe, von der einfachen Überfahrt bis hin zur Beschichtung mit einer Edelstahlmaske, gewonnen werden. Die Evaluierung des Simulationsmodells mit Hilfe praktischer Versuchsdurchführungen weist deutlich die starke Vereinfachung des erstellten Simulationsmodells nach, zeigt gleichzeitig aber auch das Optimierungspotential der thermischen Simulation auf. Vor allem eine Weiterentwicklung hinsichtlich thermomechanischer Verformung ermöglicht die Darstellung spezifischer Spannungszustände, abhängig von der jeweiligen Prozessparameterkombination und Materialauswahl, im Substratkörper sowie innerhalb der entstehenden Metallschicht.

Eine elektrische Kontaktierung von CAPM-Strukturen unter Verwendung von Leitlebstoff und Lotpaste sowie die Betrachtung von möglichen Passivierungsverfahren zum Schutz der generierten Kupferstrukturen stellen den Abschluss der praktischen Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit dar. Die erstmalige Bestimmung der Haftzugfestigkeit von CAPM-Strukturen unter Einsatz des HPP-Tests weist die vorab in dieser Arbeit aufgezeigten guten Eigenschaften der CAPM-Strukturen nach und zeigt gleichzeitig eine mögliche zukünftige standardisierte Testmethode auf. Scherfestigkeitsuntersuchungen an passiven SMD-Komponenten der Bauform 1206 in Verbindung mit Schliffbildanalysen bilden die unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Verbindungsmedien qualitativ und quantitativ ab. Darüber hinaus können anhand der vorliegenden Ergebnisse neue Erkenntnisse in Bezug auf den Haftmechanismus zwischen Substrat, CAPM-Struktur, Verbindungsmedium und elektronischem Bauelement gewonnen werden. Die CAPM-Zinnbeschichtung der generierten Kupferstruktur ermöglicht ein schnelles und vor allem prozessintegriertes Passivierungsverfahren, wodurch das Potential der CAPM-Technologie nochmals bekräftigt wird. Folglich ist mit einer entsprechenden Prozessparameterkombination die Umsetzung einer mediendichten Zinnbeschichtung realisierbar.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten zeigen das Potential der strukturierten additiven Plasmabeschichtungstechnologie, insbesondere des CAPM-Verfahrens, in Bezug auf die vielseitigen Einsatz- und Variationsmöglichkeiten. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen einen Einsatz der CAPM-Technologie sowohl in der MID-Technik, um innovative Anwendungen auf Basis alternativer Substratmaterialien mit leistungsfähigen Metallstrukturen zu versehen, als auch in der Leistungselektronik, um die Substitution aktueller aufwändiger Metallisierungsverfahren zu ermöglichen und somit kosten- und zeiteffizientere Prozessketten zu ermöglichen.

Anhand der dargestellten Ergebnisse kann die Notwendigkeit für eine weiterführende detailliertere Betrachtung der Haftmechanismen zwischen CAPM und Substratoberfläche abgeleitet werden und unter Verwendung des erarbeiteten Prozessmodells erfolgen. Des Weiteren bietet die Simulation des Beschichtungsprozesses enormes Optimierungspotential, was mit den allgemeinen mathematischen und physikalischen Betrachtungen in Bezug auf die Abhängigkeit der Schichteigenschaften von der Prozessparameterauswahl sinnvoll zu verknüpfen ist. Darüber hinaus können einzelne Aspekte, wie beispielsweise die Passivierung der generierten Kupferschichten, durch eine ausgiebige Untersuchung anhand eines definierten Einsatzbereichs sinnvoll erweitert werden. Vor allem aber sollte die Charakterisierung von CAPM auf additiv gefertigten Substratkörpern fokussiert werden, da zum einen die Plasmatechnologie das notwendige Potential für eine strukturierte additive Beschichtung verschiedenster Substratmaterialien besitzt und zum anderen additive Fertigungstechnologien durch eine Funktionsintegration mit Hilfe von additiven Metallisierungsverfahren neue innovative Anwendungsgebiete erschließen können.

## 8. Summary

Based on plastic or ceramic materials the additive manufacturing technologies belong to the state of the art in the industrial sector, especially in rapid prototyping, but also increasingly in the manufacturing of substrate carriers. Considering the ongoing growing pace of innovation an increasing cost reduction, combined with an increasing integration density is required. Structured additive metallization processes, in particular plasma technologies, in this context represent a meaningful expansion of current manufacturing processes while providing an enormous application potential for the development of innovative products. Above all, the CAPM process takes both potential fields of application in the MID technology, as well as in power electronics due to its short process chain, the high flexibility and the almost unlimited choice of materials. The design and the construction of a CAPM process cell, the basic qualifications of copper layers generated by CAPM technology based on different substrate materials regarding tensile bond strength, thickness, porosity and current-carrying capacity, the development of a first thermal simulation model and a first consideration of the assembling an interconnection technology based on CAPM structures represent the most important aspects of this work.

The design and implementation of CAPM process cell requires in advance a basic clarification of the handling of the substrate materials, which differs depending on the scope of application and quantity to enable a cost-effective and efficient system configuration. Based on this one with the specifications corresponding robot system will be integrated, which simultaneously represents the central control unit of the entire process cell. The results of this study show a process cell, which is characterized by a high degree of flexibility in terms of varying substrate materials and machining sequences. In addition, a peripheral base configuration is presented, which is imperative for scientific investigations in the sense of material qualification. The transfer of knowledge gained on the use of the CAPM technology in serial production shows more system configuration possibilities, represents required safety systems and thus displays a range of optimization potentials.

The characterization and process optimization of CAPM based on different substrate materials (plastics, fibre-reinforced plastics, ceramics, Si-wafer) points the potentials of the plasma technology and at the same time forms the basis for future research and development studies relating to structured additive metallization. The enormous variety of process parameters combinations and particularly the influence of the individual process parameters on the tensile bond strength, thickness, porosity and current-carrying capacity and the interaction between the process parameters themselves form the basis for a comprehensive understanding of the CAPM process. The work shows basic considerations of selected process parameters, their influence on the mentioned quality parameters and recommendations for appropriate parameter combinations depending on the specific requirements. The preparation of the results obtained by means of an appropriate process model and the graphical representation

of the process parameters dependencies provide a summary of the key results. A combination of the knowledge practically achieved with universal mathematical and physical equations and chemical analysis allowed a more detailed consideration of the coating process and thus can define material-specific accelerate the process parameters clearly.

Another focus of the study was the initial definition of a simplified thermal simulation model to map quickly and cost effectively the influence of process parameter variations on the properties of the generated layer structures. Here, the temperature distribution in the substrate material during the coating process is graphically displayed. The model allows a variation of the substrate material, the heat affected zone, the process speed, the heat flow density and the distance between the substrate surface and the plasma nozzle. Based on this first selection findings of various coating processes, from simple crossing through to coating with a stainless steel mask, are obtained. The evaluation of the simulation model by means of practical experimental investigations clearly demonstrates the strong simplification of the created simulation model, but also demonstrates the potential for optimization of thermal simulation. Especially an evolution in terms of thermomechanical deformation allows the display of specific stress conditions inside the substrate body as well as generated metal layer, depending on the process parameter combinations and choice of substrate materials.

Electrical contacting of CAPM structures using conductive adhesive and solder paste and the consideration of possible passivation methods to protect the generated copper structures represent the completion of the practical investigations in the course of this study. The initial determination of the tensile bond strength of CAPM structures using the HPP-test re-proves the pre-identified good qualities of CAPM structures in this study and simultaneously shows a possible future standardized test method. Shear strength tests on passive 1206 SMD components in connection with microsection analysis form the different results of different connection media from both qualitatively and quantitatively. In addition, new insights can be gained in terms of the adhesion mechanism between substrate, CAPM structure, connecting medium and electronic component of the available results. The CAPM based tin coating of the copper generated structure allows a fast and above all process-integrated passivation process, whereby the potential of the CAPM technology is reaffirmed. Consequently, using an appropriate process parameter combination the implementation of a medium-tight tin coating can be realized.

The research study carried out to show the potential of structured additive plasma coating technology, in particular of the CAPM process, in terms of versatility and variations. The results obtained enable the use of the CAPM technology both in the MID technology to provide innovative applications based on alternative substrate materials with high-performance metal structures, as well as in power electronics to allow the substitution of current complex metallization processes realizing cost-effective and time-efficient process chains.

Based on the presented results, the need for a further detailed examination of the adhesion mechanisms between CAPM and substrate surface are derived and carried out using the developed process model. Furthermore, provides the simulation of the coating process enormous optimization potential, which is to combine useful with the general mathematical and physical considerations regarding the dependence of the layer properties of the process parameters selection. In addition, certain aspects, such as tin passivation of the generated copper layers, are useful enhanced by an extensive investigation based on a defined application range. Above all, the characterization of CAPM should be focused on additive manufactured substrate carriers, because on the one hand, the Plasma technology has the required potential for a structured additive coating of various substrate materials and on the other hand additive manufacturing technologies can develop new innovative application fields by functional integration using additive metallization process.



## 9. Abkürzungsverzeichnis

2K	Zweikomponentenspritzguss
3D	Dreidimensional
AC	Wechselstrom
AG	Aktiengesellschaft
Ag	Silber
AJ	Aerosol-Jet
Al	Aluminium
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
AlN	Aluminiumnitrid
AMB	Active Metal Brazing {Aktivlöten}
APDL	ANSYS Parametric Design Language
Ar	Argon
Au	Gold
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
Bi	Bismut
CAD	Computer-Aided Design {Rechnerunterstütztes Konstruieren}
CAM	Computer-Aided Manufacturing {Rechnerunterstützte Fertigung}
CAPM	Cold-Active Plasma-Metallization {Kaltaktive Plasma-Metallisierung}
CFK	Kohlefaserverbundwerkstoff
COM Port	Communication Port
CTE	Coefficient of Thermal Expansion {Längenausdehnungskoeffizient}
Cu	Kupfer
CVD	Chemical Vapor Deposition {Chemische Dampfphasenabscheidung}
DC	Gleichstrom
DCB	Direct Copper Bonded
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E-Modul	Elastizitätsmodul
EMF	Elektrische und magnetische Störfelder
EN	Europäischen Norm
FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FEM	Finite-Elemente-Methode
FR4	Leiterplattenmaterial aus Epoxidharz und Glasfasergewebe
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	Glasfaserverbundwerkstoff
GmbH	Gemeinschaft mit beschränkter Haftung
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
He	Helium
HPP-Test	Hot-Pin-Pull-Test
IEEE 1394	FireWire
IPC	Association Connecting Electronics Industries, ehemals: Industrial Printed Circuits
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
KCP	KUKA Control Panel
KMG	Koordinatenmessgerät
LDS	Laserdirektstrukturierung
LED	Light-Emitting Diode
LTE	Long Term Evolution
MFC	Mass Flow Controller
MID	Molded Interconnect Devices {Dreidimensionale Schaltungsträger}
MLPM	Multi-Level Plasma-Metallization {Mehrstufige Plasma-Metallisierung}
Mo	Molybdän
N <sub>2</sub>	Stickstoff
Ni	Nickel
PA	Polyamid
PC	Personal Computer
PVD	Physical Vapor Deposition {Physikalische Dampfphasenabscheidung}
RFID	Radio-Frequency Identifikation
SE	Societas Europaea {Europäische Aktiengesellschaft}
Si-Wafer	Silizium-Wafer
SMD	Surface Mount Device {Bauelement für die Oberflächenmontage}

Sn	Zinn
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point
Ti/TiN	Titan/Titannitrid
TKPM	Thermo-Kinetic Plasma-Metallization {Thermokinetische Plasma-Metallisierung }
TRM	Thermal Risk Management
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UP	Ungesättigte Polyesterharze
USB	Universal Serial Bus
VERL	Vacuum Evaporation on Rotating Liquid
VEROS	Vacuum Evaporation on Runnig Oil Substrate
WLAN	Wireless Local Area Network {Drahtloses lokales Netzwerk}
W	Wolfram
X-RAY	Röntgenstrahlung

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] BOBZIN, K.: *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*. 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2012
- [2] Roths, K.: *Forschungsagenda Oberfläche: Analyse des Innovations- und Nachhaltigkeitspotenzials im Bereich der Oberflächenbehandlung*. Neuss: DFO, 2006
- [3] Franke, J.: *Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D MID)*. München: Carl Hanser Verlag, 1995 (Fertigungstechnik - Erlangen 50)
- [4] FRANKE, J. (Hrsg.); Franke, Jörg: *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger*. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [5] FRANKE, J.; GAUSEMEIER, J.; GOTH, C.; DUMITRESCU, R.: *MID-Studie 2011: Markt- und Technologieanalyse*. Eine Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.). Erlangen, 2011
- [6] McMILLAN, E.: *Status and Prospects for MID in the antenna industry*. In: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.): *Proceedings 9th International Congress Molded Interconnect Devices MID*. Erlangen: Meisenbach Verlag, 2010 (MID-Kongress).
- [7] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.); FELDMANN, K. (Hrsg.): *3D-MID Technologie: Räumliche elektronische Baugruppen. Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. München: Hanser Verlag, 2004
- [8] SCHRAMM, R.; HÖRBER, J.; GOTH, C.; FRANKE, J.: *Additive Metallisierung von MID durch Aerosoljet-Druck und kaltaktive Atmosphären-Plasmabeschichtung*. In: Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme: Entwurf mechatronischer Systeme. Bielefeld: Hans Gieselmann Druck, 2013, S. 223–234
- [9] ALBRECHT, H.-J.; BUSCHE, N.; WILKE, K.; STROGIES, J.: *Aufbau- und Verbindungstechnik leistungselektronischer Module und Baugruppen*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (2013), Nr. 9, S. 1930–1936
- [10] Syed-Khaja, A.; Kaestle, C.; Franke, J.: *Reliable packaging technologies for power electronics: Diffusion soldering and heavy copper wire bonding*. In: 3rd International. Electric Drives Production Conference (EDPC), 2013
- [11] KÄSTLE, C.; SYED-KHAJA, A.; FRANKE, J.: *Zuverlässige Verbindungstechnologien für die Leistungselektronik: Diffusionslöten und Kupfer-Dickdrahtbonden*. In: Deutsche IMAPS-Konferenz: Herbstkonferenz, 2013
- [12] SCHRAMM, R.; FRANKE, J.: *Manufacturing of 3D Mechatronic Systems with Plasma Technology*. In: Smart Systems Integration: 8th International Confer-

- ence & Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems - MEMS, NEMS, ICs and Electronic Components. Aachen: Apprimus Verlag, 2014, S. 117–123
- [13] GEBHARDT, A.: *Generative Fertigungsverfahren*. 4. Auflage. München: Hanser Verlag, 2013
- [14] AMEND, P.; GOTH, C.; FRICK, T.; SCHMIDT, M.: *ADDIMID Technology and Aerosol Jet Printing for Functional MID Prototypes by the use of Stereolithography*. In: Birkicht, A.; Franke, J.; John, W.; Kuhn, T. (Hrsg.): 10th International Congress Molded Interconnect Devices. Nürnberg, 2012
- [15] HÖRBER, J.; GLASSCHRÖDER, J.; PFEFFER, M.; SCHILP, J.; ZÄH, M.; FRANKE, J.: *Approaches for Additive Manufacturing of 3D Electronic Applications*. In: Procedia CIRP: Variety Management in Manufacturing - Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems: Elsevier B.V., 2014 (17), S. 806–811
- [16] WITT, G.; ENSTHALER, J.; GRIMM, T.; GÜNTHER, B.; JELL, G.; LENZ, J.; MARQUARDT, E.; MUNSCH, M.; MÜLLER, A.-K.; MÜLLER-LOHMEIER, K.; PAEHL, R.; REHME, O.; RIEKER, S.; SEHRT, J. T.; SÄNDIG, S.: *Additive Fertigungsverfahren*. VDI, 2014
- [17] REICHENBERGER, M.; JILLEK, W.; HÖRBER, J.; FRANKE, J.: *Functionalization of Thermoplastics using Inkjet- and Aerosoljet-Printing Technologies*. In: Birkicht, A.; Franke, J.; John, W.; Kuhn, T. (Hrsg.): 10th International Congress Molded Interconnect Devices. Nürnberg, 2012
- [18] GOTH, C.; PUTZO, S.; FRANKE, J.: *Aerosol Jet Printing on Rapid Prototyping Materials for Fine Pitch Electronic Applications*. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Orlando, FL, USA, 2011
- [19] FRANKE, J.; GOTH, C.; HÖRBER, J.; PUTZO, S.: *Aerosol Jet Printing and Rapid Prototyping Methods for Flexible Structuring of 3D Interconnect Devices*. In: International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 2011
- [20] PUHLMANN, C.: *MID-Bauteile: Die Laser-Direkt-Strukturierung auf der Überholspur*. In: elektronik.net 04/2010
- [21] JOHN, W.: *Possibilities of LDS Coatings*. In: KÜCK, H. (Hrsg.): Innovative Anwendungen der MID-Technik. Stuttgart, 2013, S. 23–30
- [22] SÜß-WOLF, R.: *Thermokinetic Process Flamecon® for Large Scale MID*. In: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.): Proceedings 9th International Congress Molded Interconnect Devices MID. Erlangen: Meisenbach Verlag, 2010 (MID-Kongress).
- [23] Bisges, M.: *PLASMACOAT 3D is the revolutionary dry metallization process for the next generation of polymer electronic*. In: PEP - Centre Technique de la Plasturgie et des Composites (Hrsg.): Microsystèmes sur plastique, 2013

- [24] THEOPHILE, E.: *The plasmadust process: An innovative process for metal coatings on a wide variety of substrates*. In: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.): Proceedings 9th International Congress Molded Interconnect Devices MID. Erlangen: Meisenbach Verlag, 2010 (MID-Kongress).
- [25] DZUR, B.: *Praktische Plasmaoberflächentechnik: Leitfaden für Studium und Anwendung*. Bad Saulgau: Leuze, 2011
- [26] THEOPHILE, E.; FISCH, D.: *Metallisierungsmöglichkeit ohne Einsatz von Nasschemie: Das innovative plasmadust®-Verfahren zur temperaturschonenden Beschichtung unter Atmosphärendruck*
- [27] BACH, F.-W.; MÖHWALD, K.; LAARMANN, A.; WENZ, T.: *Moderne Beschichtungsverfahren*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005
- [28] HEIMANN, R. B.: *Plasma spray coating: Principles and applications*. 2nd rev. and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008
- [29] Erdi-Betchi; Ali: *Forschungsbericht 2004-20: Beschichtungsverfahren Kaltgasspritzen: Experimentelle und numerische Untersuchungen der Dynamik der partikelbeladenen Überschallströmung*. Göttingen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2004
- [30] SCHMIDT, T.: *Kaltgasspritzen: Eine Analyse des Materialverhaltens beim Partikelauflaufprall und die daraus abgeleitete Prozessoptimierung*. Aachen: Shaker, 2007 (Berichte aus der Werkstofftechnik)
- [31] MATHESIUS, H.-A.; KRÖMMER, W.: *Praxis des thermischen Spritzens: Anleitung für das Fachpersonal*. Düsseldorf: DVS Media, 2009 (Die schweisstechnische Praxis Bd. 37)
- [32] HOFMANN, H.; SPINDLER, J.: *Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik: Grundlagen - Vorbehandlung - Oberflächenreaktionen - Schichtabscheidung - Strukturierung - Prüfung*. 2. aktualisierte Auflage, München, Wien: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010
- [33] LANGMUIR, I.: *Oscillations in Ionized Gases*. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1928
- [34] Fragstein und Niemsdorff, Friederike von: *Wechselwirkungen zwischen Plasmaprozessen und Thermoplastischen Oberflächen*. 1. Auflage, Aachen: Druck und Verlagshaus Mainz GmbH Aachen; Mainz, 2012 (Bd. 230)
- [35] FRIDMAN, A.: *Plasma Chemistry*. New York. In: Cambridge University Press 2008
- [36] MARTIN, P. M. (Hrsg.); Martin, Peter M.: *Handbook of deposition technologies for films and coatings: Science, applications and technology*. 3rd ed. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2010

- [37] GRILL, A.: *Cold Plasmas in Material Technology*. New York. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 1994
- [38] FRANZ, G.: *Niederdruckplasmen und Mikrostrukturtechnik*. 3. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2004
- [39] N. N.: *Induction Plasma Technology*. <http://tekna.com/equipment/induction-plasma-technology/> (Stand: 24.11.2014), Zugriff am 24.11.2014
- [40] GOCK, E.; BEENKEN, W.; GRUSCHKA, M.: *Exzenter-Schwingmühle*. Anmeldenr. DE19934335797. Veröffentlichungsnr. DE4335797 C2
- [41] EISENKOLB, F. (Hrsg.): *Einführung in die Werkstoffkunde: Band V: Pulvermetallurgie*. 2. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1966
- [42] FRITZ, A. H.; SCHULZE, G.: *Fertigungstechnik*. 10., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer Berlin, 2012
- [43] SCHAT, W.; WIETERS, K.-P.; KIEBACK, B.: *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. 2. bearbeitete und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2007
- [44] S. Yatsuya; Y. Tsukasaki; K. Yamauchi; K. Mihama: *Ultrafine particles produced by Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate (VEROS) and the modified method*. In: Journal of Crystal Growth 70 (1984), 1–2, S. 533–535
- [45] CETEGEN, B. M.; YU, W.: *In-situ particle temperature, velocity, and size measurements in DC Arc plasma thermal sprays*. In: Journal of Thermal Spray Technology 8 (1999), Nr. 1, S. 57–67
- [46] VARDELLE, M.; VARDELLE, A.; FAUCHAIS, P.; BOULOS, M. I.: *Particle dynamics and heat transfer under plasma conditions*. In: AIChE Journal 34 (1988), Nr. 4, S. 567–573
- [47] MANN, D. A.: *Plasmamodifikation von Kunststoffoberflächen zur Haftfestigkeitssteigerung von Metallschichten*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer, 1994 (IPA-IAO-Forschung und -Praxis Bd. 189)
- [48] REICHINGER, G.; GÖTZ, K.; SÜß-WOLF, R.: *LEONI FLAMECON® - strukturierte Metallisierung für höhere Leistungen*. In: Bayerisches Kompetenznetzwerk für Mechatronik (Hrsg.): Tagungsband: Augsburg, 15.6. - 16.6.2005. Sonderausgabe. Donauwörth: Schätzl Druck & Medien, 2005
- [49] LAKE, M.: *Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung: Vorbehandeln, Beschichten, Funktionalisieren und Kennzeichnen von Kunststoffoberflächen*. München: Hanser, 2009
- [50] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Flamecon*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Flamecon> (Stand: 21.11.2014), Zugriff am 21.11.2014

- [51] N. N.: *Atmosphärisches Plasmaspritzen*. <http://www.medicoat.ch/thermische-spritzsysteme/atmosphaerisches-plasmaspritzen-aps/> (Stand: 04.12.2014), Zugriff am 04.12.2014
- [52] BOLOT, R.; SOKOLOV, D.; KLEIN, D.; CODDET, C.: *Nozzle Developments for Thermal Spray at Very Low Pressure*. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 15 (2006), Nr. 4, S. 827–833
- [53] BOLOT, R.; KLEIN, D.; CODDET, C.: *Design of a nozzle extension for thermal spray under very low pressure conditions*. In: HOFE, D. von (Hrsg.): *Thermal Spray 2004: Advances In Technology and Application, Proceedings of the International Thermal Spray Conference*. Materials Park, Palo Alto: ASM International, 2004, S. 574–579
- [54] N. N.; Medicoat AG: *Pulverförderer "Flowmation"*. Mägenwil, Schweiz, 2014
- [55] BISGES, M.: *New Opportunities for the Structured Metallization of Plastics*. In: *Proceedings 11th International Congress Molded Interconnect Devices MID*. Nürnberg, 2014
- [56] N. N.: *Plasma Innovations: Plasmacoat 3D*. <http://www.plasma-innovations.com/plasmacoat-3d.html> (Stand: 21.11.2014), Zugriff am 21.11.2014
- [57] SCHRAMM, R.; REITBERGER, T.; FRANKE, J.: *Electrical Characterization of Fibre-Reinforced Plastics by Atmospheric Plasma Technology*. In: *47th International Symposium on Microelectronics (IMAPS)*. San Diego, 2014
- [58] SCHRAMM, R.; FRANKE, J.: *Electrical Functionalization of Thermoplastic Materials by Cold Active Atmospheric Plasma Technology*. In: *Proceedings of the 15th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*. Singapore, 2013
- [59] Theophile, E. et al.: *Development of a novel DC plasma source for coating and surface modification under atmospheric pressure*. In: ISEC (Hrsg.): *Proceedings 3rd International Surface Engineering Congress*. Orlando, FL, USA, 2004
- [60] N. N.; Reinhausen Plasma GmbH (Hrsg.): *plasmadust® - Technische Daten*. Regensburg, 2011
- [61] GAUSEMEIER, J.; BINGER, V.; PEITZ, T.: *Chancen und Grenzen für den Einsatz der Technologie MID: Markt- und Technologieanalyse*. Eine Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.). Paderborn, 2003
- [62] GOTH, C.: *Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)*. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2013
- [63] BORGES, M.: *Laser schreibt dreidimensionale Leiterbahnen*. In: *Elektronik Sonderausgabe Räumliche elektronische Baugruppen 2011*, S. 12–16
- [64] HÖRBER, J.; SCHÜTZ, K.; AMEND, P.; SCHMIDT, M.; FRANKE, J.: *Selektives Laser- und Lichtsintern von Aerosol-Jet gedruckten Nano-Silbertinten für thermoplasti-*



- sche Schaltungsträger*. In: SCHMIDT, M.; ROTH, S.; AMEND, P. (Hrsg.): *Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik: Tagungsband des 16. Seminars LEF 2013*. Bamberg: Meisenbach, 2013, S. 235–252
- [65] SIEPE, D.; BAYERER, R.; ROTH, R.: *The Future of Wire Bonding is? Wire Bonding!* In: *Proceedings of the 6th International Conference on Integrated Power Electronics System (CIPS)*, 2010
- [66] BAYERER, R.: *Higher Junction Temperature in Power Modules – a demand from hybrid cars, a potential for the next step increase in power density for various Variable Speed Drives*. In: *Proceedings of the International Exhibition & Conference for Power Electronics Intelligent Motion Power Quality (PCIM)*, 2008
- [67] GOETZ, M.; KUHN, N.; LEHMEIER, B.; MEYER, A.; VOELLER, U.: *Comparison of silicon nitride DBC and AMB substrates for different applications in power electronics*. In: *Proceedings / PCIM Europe*. Berlin, Offenbach: VDE-Verl, 2013, S. 57–65
- [68] PÖNICKE, A.; SCHILM, J.; BÖHM, G.; SCHNEE, D.: *Aktivlöten von Kupfer mit Aluminiumnitrid- und Siliziumnitridkeramik*. In: *Keramische Zeitschrift* 2011
- [69] KOLLENBERG, W. (Hrsg.); Kollenberg, Wolfgang: *Technische Keramik: Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik*. 2. Aufl. Essen: Vulkan-Verl., 2009
- [70] NIHON, S.: *Advanced ceramic technologies & products*. Tokyo, New York: Springer, 2012
- [71] SCHULZ-HARDER, J.: *DCB (Direct Copper Bonding) Substrattechnologie*. In: JILLEK, W.; KELLER, G. (Hrsg.): *Handbuch der Leiterplattentechnik*. 1. Aufl. Saulgau/Württ: Leuze, 2003, S. 733–760
- [72] SCHULZ-HARDER, J.: *Process for the manufacture of metal-ceramic compound material in particular metal-ceramic substrates and metal-ceramic compound material especially metal-ceramic substrate manufactured according to this process*. Anmeldenr. US 10/416,540. Veröffentlichungsnr. US7036711 B2
- [73] Arthur D. Little: *Markt- und Technologiestudie Leistungselektronik Automotive 2015*. München, 2005
- [74] GILLHUBER, A.: *Elektromobilität treibt Nachfrage an*, In: *elektroniknet.de*, 2013 <http://www.elektroniknet.de/automotive/elektromobilitaet/artikel/101547/> (Stand: 26.09.2013), Zugriff am 13.02.2015
- [75] RÜGHEIMER, H.: *Leistungselektronik*. In: *Bayrischer Wirtschaftskcluster (Hrsg.): Green IT - Energieeffizienz in Rechenzentren, Serveranwendungen und IT Geräten*. München, 2010.
- [76] DIN EN 582. 1994-01. *Thermisches Spritzen; Ermittlung der Haftzugfestigkeit*
- [77] N. N.; Keyence Deutschland GmbH (Hrsg.): *Leitfaden Konfokales Laser-Mikroskop*. 2011

- [78] ADAM, J.: *Strombelastbarkeit von Leiterbahnen Teil I: Grundlagen*. In: PLUS (2002), Nr. 10, S. 1669–1673
- [79] KNIES, W.; SCHIERACK, K.: *Elektrische Anlagentechnik*. 5. Aufl. München: Hanser Verlag, 2006
- [80] IPC-2221A. 05.2003. *Generic Standard on Printed Board Design*
- [81] N, N.; Andus Electronic GmbH(Hrsg.): *Strombelastbarkeit auf Leiterplatten*. <http://www.andus.de/leiterplatte/strombelastbarkeit.php> (Stand: 01.08.2013), Zugriff am 01.08.2013
- [82] ADAM, J.: *Strombelastbarkeit von Leiterbahnen Teil III: Weitere Diagramme für Multilayer und Umrechnungsregeln*. In: PLUS (2004), Nr. 4, S. 513–518
- [83] N, N.; Adam Research (Hrsg.): *Mindeststrombelastbarkeit von Leiterbahnen*. <http://www.adam-research.de/pdfs/PCB-Physik2.pdf> (Stand: 08.01.2015), Zugriff am 08.01.2015
- [84] IPC-2152. 08.2009. *Standard for Determining Current-Carrying Capacity*
- [85] OBERENDER, L.: *Berechnung der Stromtragfähigkeit auf Leiterplatten - IPC-2152 im Vergleich zur Praxis*. In: PLUS (2010), Nr. 11, S. 2524–2534
- [86] N. N.; Reinhausen Plasma GmbH (Hrsg.): *Innovative kaltaktive Plasmatechnologie*. Regensburg, 2012
- [87] N. N.; Reinhausen Plasma GmbH (Hrsg.): *plasmadust® - ein kostengünstiges und temperaturschonendes Verfahren zur lösungsmittelfreien Metallisierung*. Regensburg, 2012
- [88] N. N.; Vögtlin Instruments AG (Hrsg.): *Datenblatt red-y compact series*. Aesch (CH), 2012
- [89] N,N.; KUKA Roboter GmbH (Hrsg.): *Betriebsanleitung KUKA KR 5 sixx R850*. 2011
- [90] N. N.: *Datenblatt optris CTlaser: Infrarotsensor*. Berlin, 2011
- [91] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: *Industrial Robots Accuracy Optimization in the Area of Structuring and Metallization of Three Dimensional Molded Interconnect Devices*. In: Pedro Neto; MOREIRA, A. P. (Hrsg.): *Robotics in Smart Manufacturing (FAIM)*. Heidelberg: Springer, 2013
- [92] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: *Usage of Industrial Robots as Flexible Handling Devices Supporting the Process of Three Dimensional Conductive Pattern Generation*. In: 11th International Congress Molded Interconnect Devices. Nürnberg, 2014
- [93] N, N.; Automated Precision Inc. (Hrsg.): *Radian. Der Tracker, der Sie sehen kann*. 2011
- [94] N, N.; Automated Precision Inc. (Hrsg.): *Datenblatt Radian*. 2012

- [95] SCHÖNE, C.: *Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik*. München: Verl. Dr. Hut, 2009
- [96] N. N.; carat robotic innovation GmbH (Hrsg.): *FAMOS robotic®*.  
<http://www.famos-robotic.de/index.php?id=product> (Stand: 13.12.2014), Zugriff am 13.12.2014
- [97] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Polyamide*.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Polyamide#Verwendung> (Stand: 16.12.2014), Zugriff am 16.12.2014
- [98] N. N.; Evonik Industries AG (Hrsg.): *Datenblatt VESTAMID® D*. Marl, 2012
- [99] N. N.; Evonik Industries AG (Hrsg.): *Datenblatt VESTAMID® L*. Marl, 2012
- [100] HÖRBER, J.; GOTH, C.; FRANKE, J.; HEDGES, M.: *Electrical Functionalization of Thermoplastic Materials by Aerosol Jet Printing*. In: *Proceedings of the 13th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*. Singapore, 2011, S. 813–818
- [101] ZEH, K.: *Selection and Qualification of a Test Method for Determining Adhesion of MID Metallization in the LDS-Technology*. In: 10th International Congress Molded Interconnect Devices. Nürnberg, 2012
- [102] FISCHER, A.; KUHN, T.; MÜLLER, H.: *Reliability of LDS Conductor Paths - Influencing Factors and Characterization Methods*. In: 11th International Congress Molded Interconnect Devices. Nürnberg, 2014
- [103] GOTH, C.; KUHN, T.; GION, G.; FRANKE, J.: *Hot Pin Pull Method - New Test Procedure for the Adhesion Measurement for 3D-MID*. In: 11th International Congress Molded Interconnect Devices. Nürnberg, 2014
- [104] KUHN, T.; FRANKE, J.: *Test Methods and Influencing Factors for the Adhesion Strength Measurement of Metallized Structures on Thermoplastic Substrates*. In: *Proceedings of the 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 2014, S. 655–660
- [105] N. N.; GloboMeter (Hrsg.): *Alternative Kraftstoffe in der Luftfahrt*.  
<http://de.globometer.com/flugzeug-kraftstoff.php> (Stand: 08.01.2015), Zugriff am 08.01.2015
- [106] EHRENSTEIN, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe*. 2. Auflage. München: Hanser Verlag, 2006
- [107] MÜLLER, W. H.; Technische Universität Berlin: *Projekt Verbundwerkstoffe und daraus gefertigte Strukturen: Theorie und Anwendung*. [https://www.ifm.tu-berlin.de/fileadmin/fg49/lehre1213/Verbundwerkstoffe/Mitschriften/VL1\\_Historie\\_\\_Anwendung\\_\\_Begriffe\\_1213.pdf](https://www.ifm.tu-berlin.de/fileadmin/fg49/lehre1213/Verbundwerkstoffe/Mitschriften/VL1_Historie__Anwendung__Begriffe_1213.pdf) (Stand: 19.09.2014), Zugriff am 19.09.2014
- [108] N. N.; BISTECH (Hrsg.): *Carbon-Composites – Kohlefaserverbundwerkstoffe*.  
[http://fachinfo.bistech.de/artikel/790/Carbon+Composite+\(CFK\)+-+Kohlefaserverbundwerkstoffe](http://fachinfo.bistech.de/artikel/790/Carbon+Composite+(CFK)+-+Kohlefaserverbundwerkstoffe)

- [109] DIN EN ISO 2409. 06.2013. *Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung*
- [110] HOPPERT, H.: *Aluminiumoxid-Keramik*. In: KOLLENBERG, W. (Hrsg.): *Technische Keramik: Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik*. 2. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag, 2009, S. 198–220
- [111] RITTNER, M.; GROSS, D.; GUYENOT, M.; GUENTHER, M.; HAAG, S.; KADEN, T.; REINOLD, M.; THOBEN, M.; STEGMEIER, S.; WEIDNER, K.; KOCK, M.: Robust Top Side Contact Technology on Power Semiconductors – Results from the Public Funded Project ‘ProPower’. In: Proceedings of the 8th International Conference on Integrated Power Systems (CIPS), 2014
- [112] CHAUHAN, P. S.; CHOUBEY, A.; ZHONG, Z.; PECHT, M.: *Copper wire bonding*. New York: Springer Verlag, 2014
- [113] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Aluminium*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium> (Stand: 18.01.2015), Zugriff am 19.01.2015
- [114] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Kupfer*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kupfer> (Stand: 18.01.2015), Zugriff am 19.01.2015
- [115] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Titanium nitride*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium\\_nitride](http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_nitride) (Stand: 17.11.2014), Zugriff am 19.01.2015
- [116] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Titan*. [http://de.wikipedia.org/wiki/Titan\\_%28Element%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Titan_%28Element%29) (Stand: 13.11.2014), Zugriff am 19.01.2015
- [117] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Silicium*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Silicium> (Stand: 18.01.2015), Zugriff am 19.01.2015
- [118] N. N.; Wikimedia Foundation Inc.: *Ausdehnungskoeffizient*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Ausdehnungskoeffizient#Feststoffe> (Stand: 18.12.2014), Zugriff am 19.01.2015
- [119] KLEIN, B.: *FEM*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015
- [120] JUNG, M.; LANGER, U.: *Methode der finiten Elemente für Ingenieure*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [121] GEBHARDT, C.: *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench*. 2. Auflage. München: Hanser Verlag, 2014
- [122] MERKEL, M.; ÖCHSNER, A.: *Eindimensionale Finite Elemente*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [123] BARTHOLD, F.-J.; GERKE, S.; GERZEN, N.; KIJANSKI, W.: *Einführung in die lineare Finite Elemente Methode: Vorlesungsskript*. Technische Universität Dortmund, 2013
- [124] HERWIG, H.: *Wärmeübertragung A-Z*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2000

- [125] SHIRINOV, E.; Reinhausen Plasma GmbH (Hrsg.): *Plasmabeschichten von Substraten mit der Bartec-Anlage*. Regensburg, 2014
- [126] N, N.; BASF SE (Hrsg.): *Datenblatt Ultramid® (PA)*. Ludwigshafen, 2012
- [127] N, N.; BASF SE (Hrsg.): *Hauptbroschüre Ultramid (PA)*. Ludwigshafen, 2012
- [128] SAUTTER, R.: *Leiterplatten mit oberflächenmontierten Bauelementen*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 1988
- [129] IPC-SM-782A. 08.1993. *Surface Mount Design and Land Pattern Standard*
- [130] N. N.; Nordson Dage (Hrsg.): *Mikrobrüche von Glasverbundstoffen unter Verwendung der Hot-Pin-Pull-Technik*. <http://www.nordson.com/DE-DE/DIVISIONS/DAGE/PRODUCTS/MIKROWERKSTOFFPRUEFUNG/Pages/HotPinPull.aspx> (Stand: 04.02.2013), Zugriff am 28.01.2015
- [131] MIL-STD-883G. 2006. *Test Method Standard Microcircuits*
- [132] ORTHMANN, K.: *Kleben in der Elektronik*. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1995
- [133] N. N.; Henkel AG & Co. KGaA: *Datenblatt Ablestik ICP-3535M1*. 2011

### Studentische Arbeiten im Rahmen der vorgestellten Themenfelder

Die Erstellung von Aufbauten, Auswertungen, Recherchen und Versuchen erfolgte durch Aufgabenstellung und unter fachlicher Anleitung des Autors mit Unterstützung der folgenden studentischen Arbeiten:

- AMSLINGER, D.: *Plasmabeschichten von Thermoplasten mit anschließender mikrooptischer Analyse: Plasmadust, Schliffe, Stromtragfähigkeit*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bachelorarbeit. 2013 Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- DEHM, O.: *Charakterisierung der Aufbau- und Verbindungstechnik auf Basis leitfähiger Klebstoffe für additiv generierte Plasmaduststrukturen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bachelorarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- DOLD, C.: *Additive Beschichtung von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substraten mit dem Plasmadust®-Verfahren*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl FAPS. Projektarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- FISCHER, F.: *Erzeugung, Aufbereitung und Recycling nano- und mikroskaliger Metallpulver: Plasmadust; Recycling; Nanopulver*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl FAPS. Projektarbeit. 2013, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- HEINZE, P.: *Verwendung eines kaltaktiven Atmosphärenplasmas (plasmadust®) zur additiven Erzeugung von Leiterbahnen auf thermoplastischen Kunststoffsubstraten*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Projektarbeit. 2012, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- HUBER, S.: *Charakterisierung von Kohlefaserverbundwerkstoffen für die Beschichtung mit Plasmatechnologie*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bachelorarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- MEINL, M.: *Charakterisierung der Aufbau- und Verbindungstechnik auf Basis verschiedener Lotpastensysteme für additiv generierte Plasmaduststrukturen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bachelorarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.

- PAULUS-ROHMER, D.: *Thermische Simulation eines kaltaktiven Atmosphären-Plasmas zur Beschichtung verschiedener Substratmaterialien*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Masterarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- REITBERGER, T.: *Plasmabeschichten von Kunststoffkörpern mit einem 6-Achs-Gelenk-Roboter: Plasmadust, Kunststoff, Beschichten*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Projektarbeit. 2013, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- REITBERGER, T.: *Evaluierung und Qualifizierung additiver Metallisierungen auf Faserverbundwerkstoffen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Masterarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- SOEST, P.: *Integration eines modularen Greifers und eines berührungslosen Temperatursensors in eine Roboterzelle zur Bearbeitung von MIDs mit dem Plasmadust®-Verfahren*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Diplomarbeit. 2013, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- TUZLAK, P.: *Additive Erzeugung von Kupferleiterbahnen (plasmadust®) auf Flugzeuginnenverkleidungen zur Substitution von elektrischen Kabelverbindungen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bachelorarbeit. 2012, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.

### Betreute studentische Arbeiten anderer Themenfelder

- ARMUS, F.: *Aufbau eines innovativen 3D-MID Demonstrators*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bachelorarbeit. 2012, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- BARTULEC, R.: *Konstruktion einer räumlichen elektronischen Baugruppe (MID) zur Substitution einer flexiblen Leiterplatte für die Integration in ein medizinisches Hörgerät*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Diplomarbeit. 2012, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- DOLD, C.: *Charakterisierung kombinierter Schichtsysteme basierend auf den additiven Strukturierungstechnologien Aerosol und Plasmadust*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Masterarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; HÖRBER, J.; FRANKE, J.
- LANGER, T.: *Evaluierung technologischer Grenzen der MID-Technologie in der 3D-Antennenanwendung*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Projektarbeit. 2013, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- MIRIKIAN, R.: *Charakterisierung ausgewählter MID-Herstellungsverfahren für die Audiologische Technik*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Diplomarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- OCHS, R.: *Konzeption und Evaluierung einer Prozessstrategie zur Herstellung zuverlässiger Diffusionslötverbindungen in der Leistungselektronik durch den Einsatz der Plasmadust<sup>®</sup>-Technologie*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Diplomarbeit. 2014, Betreuer: SYED-KHAJA, A.; SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- RENNER, A.: *Patentanalyse- Markt- und Technologiepotenziale: Patent, MID, LDS, 2K*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Projektarbeit. 2013, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- SCHOCK, C.: *Serientauglichkeitsprüfung der Plasmabeschichtungstechnologie für den Einsatz in der Leistungselektronik*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Masterarbeit. 2014, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.
- TAMBA, F.: *Thermomechanische Simulation einer kaltaktiven Atmosphärenplasmabeschichtung*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Masterarbeit. 2015, Betreuer: SCHRAMM, R.; FRANKE, J.