

Schlussbericht vom 31.03.2025

zu IGF-Vorhaben Nr. 22065 N

Thema

Inline-Badüberwachung für die Metallabscheidung und in der nass-chemischen Oberflächenvorbehandlung als Methode zur Qualitätssicherung (BadeMeister)

Berichtszeitraum

01.01.2022 – 30.09.2024

Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Forschungseinrichtungen

Hahn-Schickard

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Hahn
Schickard



 **Fraunhofer**
IFAM

Fraunhofer-Institut für Fertigungs-
technik und Angewandte
Materialforschung IFAM

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung des Berichts.....	3
2. Einleitung und Zielsetzung	4
3. Prozessketten und Beispielsysteme	6
4. Probenherstellung und Referenzcharakterisierung	10
5. Badüberwachung mittels Impedanzspektroskopie	12
6. Badüberwachung mittels LIBS.....	24
7. Badüberwachung in produktionsnaher Demonstrationsumgebung	34
8. Richtlinien für den praxisnahen Einsatz der Messmethoden.....	39
9. Verwendung der Zuwendung.....	40
10. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse ..	41
11. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	42
12. Danksagung	44

1. Kurzfassung des Berichts

Die richtige Zusammensetzung der Bäder ist entscheidend für den Erfolg bei der nasschemischen Oberflächenvorbehandlung und Metallabscheidung. Abweichungen oder Kontaminationen können den Prozess gefährden, weshalb eine kontinuierliche Überwachung unerlässlich ist. Ziel des Projekts war die Entwicklung von Methoden zur Inline-Überwachung von Bädern am Beispiel von spezifischen Prozessketten aus den Bereichen Oberflächenvorbehandlung und Metallabscheidung. Zwei komplementäre Messmethoden wurden entwickelt: die Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) für die Multielementanalyse und eine impedanzbasierte Methode zur Analyse der Badaktivität von außenstromlosen Kupferbädern.

LIBS erwies sich als effektive Methode zur simultanen Multielementanalyse, die eine kontinuierliche Überwachung der chemischen Zusammensetzung der Bäder ermöglichen kann. Ein entscheidender Faktor für die erfolgreiche Analyse mit LIBS ist die Probenvorbereitung. Da die direkte Messung der Flüssigkeit noch keine präzise Inline-Analyse erlaubt, wird die Flüssigkeit vorab getrocknet. Hierfür wurden neue Tiegel aus PCTG entwickelt, die durch ihre spezielle Strukturierung eine gleichmäßige Verteilung der Schicht während der Trocknung fördern. Mit diesem Ansatz können alle relevanten Metallkomponenten und Verunreinigungen in den Badlösungen erkannt werden. Dies wurde ausführlich bei Vorbehandlungsbädern für Aluminiumoberflächen und ebenfalls erfolgreich bei Metallisierungsbädern von 3D-Schaltungsträgern gezeigt.

Zur Überwachung eines außenstromlosen Kupferelektrolyten für die Metallisierung von laserdirektstrukturierten 3D-Schaltungsträgern (LDS-MID) wurde ein vereinfachtes, miniaturisiertes und kostengünstiges impedanzbasiertes Messsystem mit einem kapazitiven Sensorelement entwickelt und aufgebaut. Das Sensorelement ist die Basis für eine Impedanzmessung während der Metallabscheidung und liefert eine Aussage zum Anspringverhalten des Startkupferelektrolyten auf laseraktivierten spritzgegossenen Bauteilen, d.h. es erlaubt die Unterscheidung von wenig reaktiven und stark reaktiven Bädern. Der Aufbau des Messsystems sowie die zugehörige Steuerungs- und Auslesesoftware wurden so konzipiert, dass zum einen die Messung der Impedanz und Phase über der Zeit bei einer festen Frequenz und zum anderen Impedanzspektroskopie, d.h. die Messung bei unterschiedlichen Frequenzen in einem definierten Frequenzbereich über die Zeit möglich ist. Zudem ist die kontinuierliche Messung der Temperatur im Elektrolyten während der Kupferabscheidung möglich. Die Methode eignet sich auch zur Charakterisierung des Anspringverhaltens von unterschiedlichen laserdirektstrukturierten Substratmaterialien im außenstromlosen Kupferelektrolyten charakterisiert, was eine substratspezifische Prozessoptimierung bei der Metallisierung von 3D-Schaltungsträgern ermöglicht. Der Einsatz des Messsystems konnte abschließend in produktionsnaher Umgebung demonstriert werden.

Die Projektziele wurden erreicht.

2. Einleitung und Zielsetzung

Bei der nasschemischen Oberflächenvorbehandlung und Metallabscheidung ist die richtige Badzusammensetzung ein wesentlicher Schlüssel zum Erfolg. Abweichungen in der Zusammensetzung sowie Kontaminationen der Bäder können den Vorbehandlungs- oder Beschichtungserfolg schnell und nachhaltig gefährden. Eine Änderung der Badzusammensetzung ist aufgrund vieler Einflussfaktoren möglich, daher sind regelmäßige Qualitätskontrollen unbedingt notwendig. Für die Qualitätssicherung im Prozess ist daher eine schnelle und kontinuierliche Überwachung der Bäder essenziell (Abbildung 1).

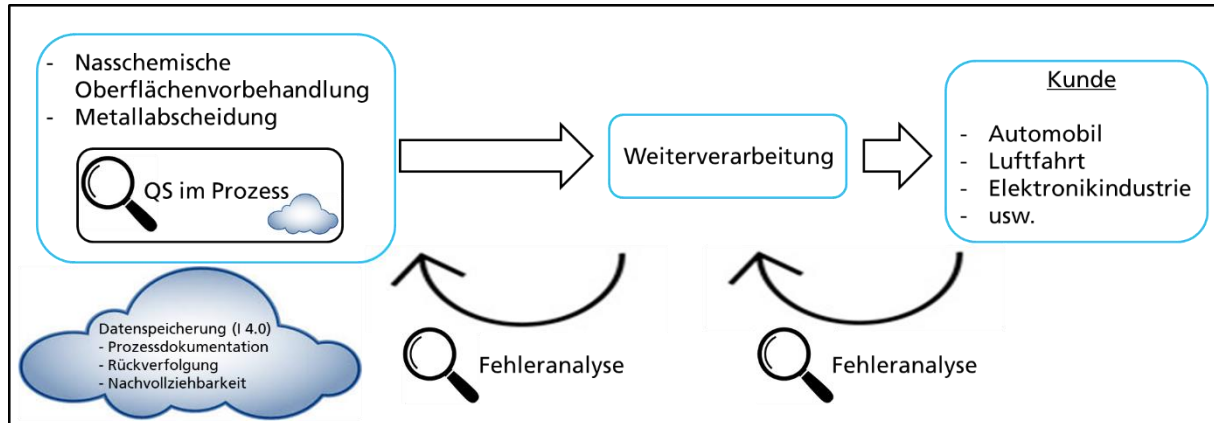


Abbildung 1: Qualitätssicherung im Prozess.

Das übergeordnete Forschungsziel des Projektes ist die Methodenentwicklung für die inline-Überwachung nasschemischer Vorbehandlungs- und Metallisierungsbäder (Abbildung 2). Es sollten zwei komplementäre Messmethoden entwickelt werden. Zur simultanen Multielementanalyse für nasschemische Vorbehandlungs- und Metallisierungsbäder kommt die Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) zum Einsatz. Für die Analyse der Badaktivität von außenstromlosen Kupferbädern findet eine impedanzbasierte Messmethode Anwendung. Diese Methoden sollen eine kontinuierliche Überwachung der gesamten Prozesskette ermöglichen, schnelles Eingreifen bei Abweichungen erlauben und die Nachvollziehbarkeit sowie spätere Fehleranalyse unterstützen.

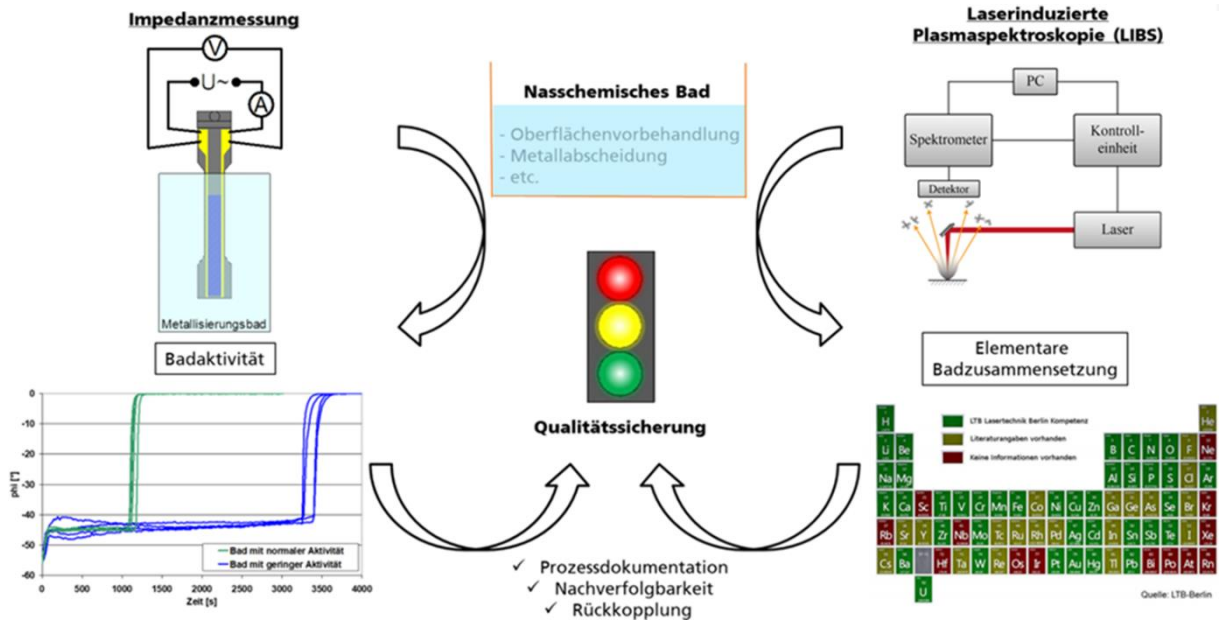


Abbildung 2: Konzept der Anwendung zweier komplementäre Messmethoden zur Inline-Analyse von nasschemischen Bädern zur Qualitätssicherung ermöglicht eine begleitende Dokumentation der gesamten Prozesskette, sofortiges Eingreifen bei Abweichungen, Nachvollziehbarkeit und spätere Fehleranalysen.

3. Prozessketten und Beispielsysteme

Es werden drei spezifische Prozessketten aus den Bereichen Oberflächenvorbehandlung und Metallabscheidung betrachtet.

Prozess 1: Konversionsschichten zur Oberflächenvorbehandlung

Für haftfeste und dauerhafte Klebungen und Beschichtungen von Aluminium ist eine geeignete Vorbehandlung zwingend erforderlich. Nur bei korrekt ausgeführter Konversionsbeschichtung können die Anforderungen an die anschließende Klebung oder Beschichtung sowie an die Korrosionsschutzeigenschaften erfüllt werden. Ein entscheidender Faktor für eine qualitativ hochwertige Vorbehandlung ist die genaue Kontrolle der Bäder, die im Prozess verwendet werden. Diese Bäder müssen spezifische Prozessparameter aufweisen, darunter die richtige chemische Zusammensetzung, Temperatur und der pH-Wert. Zudem ist es essenziell, dass die Bäder frei von Kontaminationen sind, da Verunreinigungen die Qualität der Beschichtung erheblich beeinträchtigen können. Die schnelle Ermittlung der chemischen Zusammensetzung und die Detektion von Verunreinigungen stellen oft eine Herausforderung dar. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine kontinuierliche Überwachung der Badzusammensetzung notwendig. Dies ermöglicht es, Abweichungen in Echtzeit zu erkennen und entsprechende Anpassungen vorzunehmen, um die Prozessstabilität und die Qualität der Endprodukte sicherzustellen.

Prozess 2: Metallisierung von 3D-Schaltungsträgern (Mechatronic Integrated Devices oder Molded Interconnect Devices MID)

Die Prozesskette zur Herstellung von 3D-Schaltungsträgern nach dem LDS-Verfahren (Laserdirektstrukturierung) ist in Abbildung 3 dargestellt. Das 3D-Bauteil wird aus einem Thermoplasten, welcher ein laseraktivierbares Additiv enthält, spritzgegossen. Die Erzeugung der 3D-Leiterbahnstruktur erfolgt mit einem 3D-Laserstrukturierungsprozess, bei dem die Oberfläche des Bauteils mikroaufgeraut und für den nachfolgenden außenstromlosen chemischen Metallisierungsprozess selektiv aktiviert wird. Nach einem in der Regel nasschemischen Reinigungsschritt erfolgt zuerst die außenstromlose Metallisierung mit Kupfer. Aufbauend darauf können verschiedenen Oberflächenfinishes wie z.B. Nickel/Gold (ENIG) abgeschieden werden.

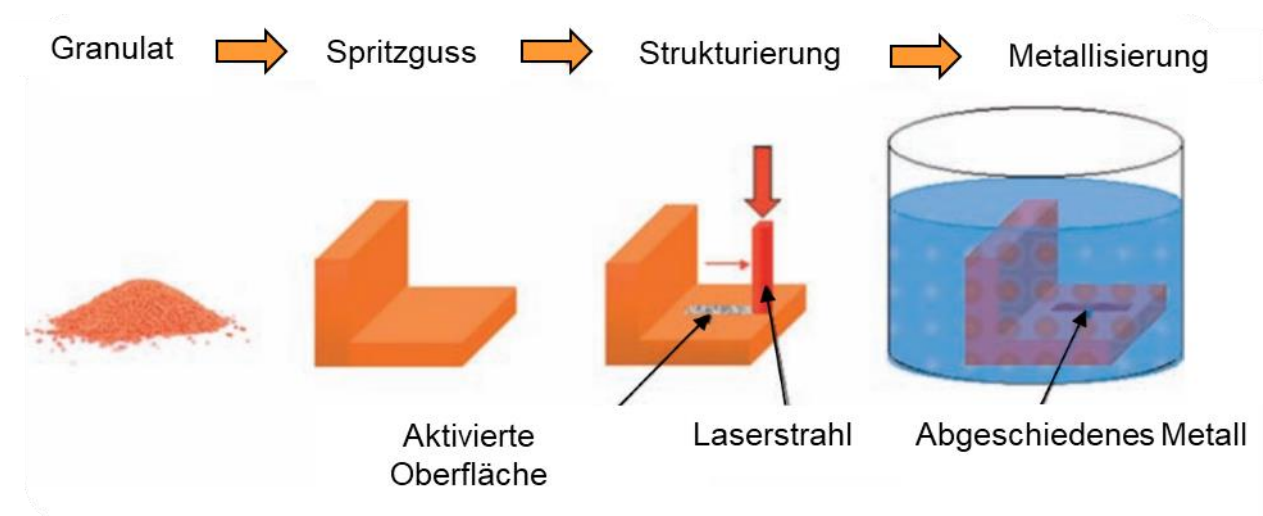


Abbildung 3: Prozesskette zur Herstellung von 3D-Schaltungsträgern.

Der kritische Prozessschritt ist die außenstromlose Kupfermetallisierung, da eine zu geringe Badaktivität zu Fehlstellen und eine zu hohe Badaktivität zu einer unerwünschten Abscheidung auf nicht aktivierten Bereichen führen kann (Abbildung 4). Die Badaktivität ist von vielen Parametern abhängig, z.B. Badzusammensetzung, Temperatur und Position im Metallisierungsbecken, und bestimmt das sog. Anspringverhalten der Kupfermetallisierung auf den laseraktivierten Bauteilen. Das Anspringverhalten beschreibt im Wesentlichen die initiale Keimbildung und das Keimwachstum auf dem laseraktivierten Bauteil in den ersten Minuten im Kupferbad und ist für die Schichtqualität essentiell. Zudem benötigen verschiedene laseraktivierte LDS-Thermoplaste oft eine unterschiedliche Badaktivität, um ein optimales Abscheideergebnis zu erzielen.

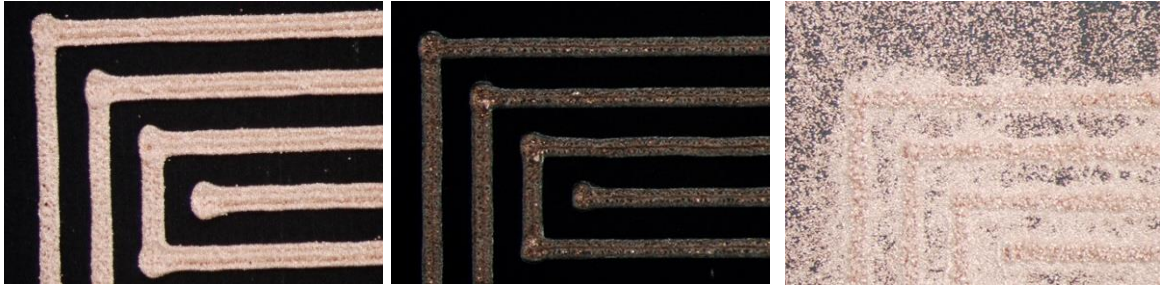


Abbildung 4: Kupferabscheidung auf 3D-Schaltungsträgern: optimale Aktivität (links), zu geringe Aktivität (Mitte), zu hohe Aktivität (rechts).

Das momentan gebräuchlichste Verfahren zur Überwachung von außenstromlosen Kupferelektrolyten für die Metallisierung laserdirektstrukturierter MID-Substrate ist die Metallisierung von laseraktivierten Testsubstraten über einen bestimmten Zeitraum und die anschließende Messung der Schichtdicke des aufgewachsenen Kupfers mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. Aufgrund der langen Verweildauer im Bad kann damit vor allem auf zu aktive Bäder nicht zeitnah reagiert werden. Zudem ermöglichen Schichtdickenmessungen von beschichteten Testsubstraten zwar die Bestimmung der Abscheiderate, aber nicht die Bestimmung des Anspringverhaltens auf dem laseraktivierten Substrat. Daher wird ein Bad mit zu hoher oder geringer Aktivität meist erst erkannt, wenn die zu beschichtende Ware bereits im Prozess ist, was im schlimmsten Fall zum Verlust der kompletten Metallisierungscharge und des gesamten Kupferelektrolyten führt.

Nach der Kupferabscheidung erfolgt die Abscheidung des Oberflächenfinishes. Hierbei spielen die Prozessparameter wie z. B. Badzusammensetzung, Temperatur und pH-Wert im Hinblick auf stabile Prozessführung und hohe Schichtqualität eine wesentliche Rolle. Regelmäßige Analysen wesentlicher Bestandteile sind erforderlich, um eine Abscheidung in gleichbleibender Qualität zu ermöglichen.

Prozess 3: Galvanische Nickelabscheidung für mikrostrukturierte Formeinsätze

Da bei diesem Prozess Metallschichtdicken im Bereich von Millimetern galvanisch abgeschieden werden, sind konstante Badparameter über mehrere Tage notwendig. Die Anreicherung von Fremdmetallen können das Schichtwachstum und die Schichteigenschaften beeinflussen. Eine schnelle vor-Ort-Kontrolle der prozessbeeinflussenden Bestandteile ist daher wichtig.

Um eine möglichst praxisrelevante Umsetzung zu gewährleisten, wurden für die drei beschriebenen Prozesse in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss jeweils Beispielsysteme festgelegt und beschafft.

- Konversionsschichten zur Oberflächenvorbehandlung

In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde der Fokus auf Dünnschicht-Vorbehandlungstechnologien gelegt. Besonders im Fokus stehen chromfreien Vorbehandlungsbäder, da die Kontrolle des Beschichtungserfolgs auf den Blechen herausfordernd ist. Um einen möglichst hohen Praxisbezug zu gewährleisten, wurden zwei verschiedene Badlösungen für die Dünnschicht-Vorbehandlung bei Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses angefragt. Zudem wurden die für den Beschichtungserfolg entscheidenden Elemente und deren Konzentration festgelegt.

Die folgenden Beschichtungssysteme wurden ausgewählt:

Hersteller	Bezeichnung
Chemetall/BASF	Oxsilan
Henkel	BONDERITE

Die Badlösungen wurden im weiteren Verlauf des Projekts mittels laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) untersucht. Hierfür wurden Verdünnungsreihen von den Proben hergestellt, um die Nachweisgrenze der entscheidenden Elemente mit LIBS zu bestimmen.

- Metallisierung von 3D-Schaltungsträgern

Bei der Auswahl eines chemisch Kupfer Elektrolyten, bei dem zur Überwachung der Badaktivität Impedanzmessungen eingesetzt werden sollten, wurde besonderer Wert daraufgelegt, dass dieser Elektrolyt für die Startmetallisierung von laserdirektstrukturierten 3D-Schaltungsträgern aus unterschiedlichen Werkstoffen (Thermoplaste, Duroplaste, Keramik) geeignet ist, d.h. ein gutes Ansprungsverhalten auf den unterschiedlichen Substraten aufweist, und zudem im europäischen Raum gut verfügbar ist. Entscheidende Badparameter sind neben der Temperatur der Gehalt an Kupfersalz, Reduktionsmittel, Alkalität und Stabilisator. Des Weiteren hat auch die Dichte einen Einfluss auf das Ansprungsverhalten.

Für das Endschichtsystem Nickel/Gold wurde ein chemisch Nickel Elektrolyt für eine Schicht mit einem mittleren Phosphorgehalt von 7-10% ausgewählt. Zu analysierende Parameter sind Nickelgehalt sowie Phosphorgehalt.

Da sich der Phosphorgehalt auch auf die Abscheidung einer Goldschicht auswirkt, wurde ein darauf abgestimmter Tauchgoldelektrolyt ausgewählt. Bei der Analytik ist hier neben dem Goldgehalt der mit zunehmendem Probendurchsatz zunehmende Anteil von Nickel und Kupfer im Elektrolyten zu betrachten.

Des Weiteren wurden Elektrolyte für das Endschichtsystem Palladium/Gold betrachtet. Neben den Edelmetallen ist bei dem Palladiumelektrolyten Kupfer zu analysieren, welches dessen Aktivität mitbeeinflusst.

Hersteller	Bezeichnung
DuPont	Chemisch Kupfer Circuposit 3350-1
riag Oberflächentechnik AG	Chemisch Nickel DURNI-COAT 520-12-50
Blendl GmbH Plating Products	Tauchgold Auroflex 20
Umicore	Chemisch Palladium Altarea TPG-39
Umicore	Teilautokatalytischer Goldelektrolyt Gobright TWX-40

- Galvanische Nickelabscheidung für mikrostrukturierte Formeinsätze

Hier ist vor allem ein Elektrolyt erforderlich, bei dem während der Abscheidung der Schichten mit einer Dicke bis zu mehreren Millimetern keine großen Spannungen in den Schichten entstehen, der Prozess sehr stabil läuft, und die Schichten auch eine hohe Duktilität aufweisen. Es wurde ein Elektrolyt auf der Basis von Nickelsulfamat ausgewählt.

Zur Herstellung der Rohkontur der Einsätze wird aufgrund der guten mechanischen Verarbeitbarkeit Messing als Substrat verwendet. Bei der Analytik sind daher neben den Badbestandteilen durch die Substrate eingetragene Komponenten wie Kupfer und Zink relevant.

Hersteller	Bezeichnung
MacDermid Enthone	Galvanisch Nickel LECTRO NIC 10-03

4. Probenherstellung und Referenzcharakterisierung

Die Proben wurden aus verschiedenen Anteilen der in Kapitel 3 beschriebenen Badlösungen und demineralisiertem bzw. vollentsalztem Wasser (VE-Wasser) hergestellt. Ein Mo-Standard (ICP-Standard 1000 mg/l Lösung, MoO_3 in NH_3 4%) wurde den Verdünnungen hinzugefügt. Für die LIBS-Untersuchung wurden die Proben auf zwei Arten vorbereitet: Zum einen wurden die Lösungen mit einer Pipette in einen Tiegel gegeben. Zum anderen wurde eine Liquid Station verwendet, die aus einem Zwei-Spritzen-Verdüner und einem Autosampler besteht. Diese Methode ermöglicht die automatisierte Verdünnung und Befüllung der Tiegel. In der Regel wurden jedoch Vorverdünnungen mit den eingangs beschriebenen Bestandteilen hergestellt, um eine bessere und gleichmäßigere Vermischung zu gewährleisten, als es beim direkten Mischen im Tiegel möglich wäre. Die hergestellten Vorverdünnungen wurden anschließend entweder mit der Liquid Station oder der Pipette in die Tiegel gefüllt. Nach der Befüllung der Tiegel wurden die Flüssigkeiten mithilfe eines Infrarot-Strahlers getrocknet (siehe Abbildung 5) und die verbleibende Schicht in den Tiegeln wurde mittels LIBS analysiert.

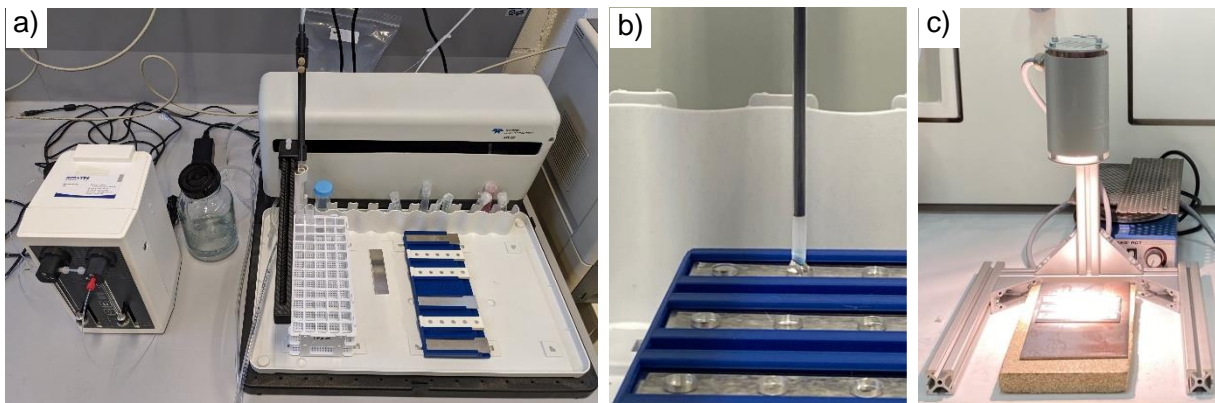


Abbildung 5: Arbeitsablauf der automatisierten Probenherstellung: Mit der Liquid Station (a) werden die Badlösungen in die Tiegel gefüllt (b) und anschließend unter einem IR-Sport getrocknet (c).

Für die LIBS-Analysen wurden Elektrolytproben der ausgewählten Beschichtungssysteme für Schaltungsträger und mikrostrukturierte Formeinsätze vorbereitet. Dabei wurden sowohl frisch angesetzte Proben als auch Proben aus laufenden Prozessen berücksichtigt. Zusätzlich wurden Proben untersucht, die mit verschiedenen definierten Fremdmetallzugaben, welche den Beschichtungsprozess beeinflussen, versetzt waren. Die Elektrolytproben wurden auch mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) als Referenz analysiert.

Für die anfängliche Referenzcharakterisierung der Badlösungen für die Dünnschicht-Vorbehandlung wurden Analysen mit Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) und Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) durchgeführt. Da die getrockneten Proben jedoch nicht vollständig homogen sind, weisen die Schichtanalysen eine hohe Messunsicherheit auf. Um eine sehr präzise Referenzanalyse zu gewährleisten, wurden in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss frisch hergestellte, flüssige Badlösungen jeweils vom Mitglied mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) untersucht.

Für die Untersuchungen zur außenstromlosen Metallisierung von laserdirektstrukturierten Molded Interconnect Devices (LDS-MID) im Kupferelektrolyten wurden spritzgegossene und laserstrukturierte Testsubstrate (Abbildung 6) als Referenzmonitore bereitgestellt. Die Teststrukturen beinhalten u.a. eine Mäander-Kamm-Struktur, welche nach der Kupferabscheidung elektrisch auf Leitfähigkeit bzw. Kurzschluss geprüft werden kann. Solche Referenzmonitore werden bei jeder Metallisierungscharge mitprozessiert und bieten die Möglichkeit die abgetrennten Metallschichten bauteilunabhängig zu bewerten.

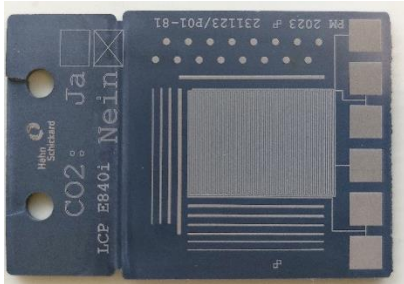


Abbildung 6: Laserstrukturiertes Testsubstrat für Metallisierungsprozess (Referenzmonitor).

5. Badüberwachung mittels Impedanzspektroskopie

Ausgangssituation

Im Rahmen eines früheren Forschungsvorhabens wurde mit einem experimentellen Aufbau die grundsätzliche Eignung eines kapazitiven Sensorelements zur Überwachung eines außenstromlosen Kupferelektrolyten gezeigt. In diesem Aufbau wurde ein komplexes Spritzgussbauteil als Sensorelement bzw. Sonde verwendet, welches selbst die komplette LDS-MID-Prozesskette für die Herstellung der Elektroden durchlaufen musste, bevor die für die Badüberwachung notwendige laseraktivierte Fläche erzeugt werden konnte, was sehr aufwändig war. Das entsprechende Spritzgusswerkzeug war für nur für einen Thermoplast ausgelegt, so dass keine substratspezifische Prozessoptimierung möglich war. Zudem hat sich der Aufbau als nicht praxistauglich herausgestellt, da das Eindringen von Badlösungen in die Sondenhalterung aufgrund von Korrosion zu wiederholten Ausfällen geführt hat. Weiterhin wurde das damals eingesetzte sehr teure LCR-Meter vom Hersteller abgekündigt und ist nicht mehr verfügbar, so dass die sehr vielversprechende Methode nicht praxisnah eingesetzt werden kann.

Konzeption neues Messsystem

Zur Überwachung eines außenstromlosen Kupferelektrolyten für die Metallisierung von laserdirektstrukturierten Molded Interconnect Devices (LDS-MID) wurde ein vereinfachtes, miniaturisiertes und kostengünstiges Messsystem mit einem kapazitiven Sensorelement entwickelt. Das Sensorelement ist die Basis für eine Impedanzmessung während der Metallabscheidung und liefert eine Aussage zum Anspringverhalten des Startkupferelektrolyten auf laseraktivierten spritzgegossenen Bauteilen, d.h. es erlaubt die Unterscheidung von wenig reaktiven und stark reaktiven Bädern. Unterschiedliche Substratmaterialien erlauben dabei eine substratspezifische Prozessoptimierung. Das Sensorelement besteht aus einem Kunststoffteil mit einer laseraktivierten Oberfläche (Sonde), welches in einer Sondenhalterung eingesteckt ist. Zur Durchführung der Messung wird diese in den außenstromlosen Kupferelektrolyten getaucht. Im Elektrolyt wird auf der aktivierten Fläche zwischen den Elektroden Kupfer abgeschieden. Zu Beginn der Messung wird zunächst ein kapazitives Verhalten beobachtet, da die laseraktivierte Fläche noch nicht mit Metall beschichtet ist. Mit Ausbildung erster Stromleitpfade ändert sich die Phasenverschiebung sprunghaft und man beobachtet zunehmend resistives Verhalten. Die Zeitspanne zwischen Eintauchzeitpunkt und Phasensprung ist ein Maß für die Badaktivität.

Ziel des Projekts war die Vereinfachung und Optimierung des Messsystems, wobei eine einfache Handhabbarkeit, Herstellbarkeit und Zuverlässigkeit im Fokus standen. Im Hinblick auf die Miniaturisierung des Gesamtsystems wurde als Messgerät ein Analog Discovery2 (AD2) (Abbildung 7) ausgewählt, welcher Messungen bei unterschiedlichen Frequenzen (zwischen 1 Hz – 1 MHz) ermöglicht. Zu diesem ist ein Impedanzboard verfügbar, an das eine Sonde zur Impedanzmessung angeschlossen werden kann. Das Messsystem wurde durch einen Industrie-PC komplettiert.



Abbildung 7: Analog Discovery 2

Der neue Aufbau des Messsystems sowie die zugehörige Steuerungs- und Auslesesoftware wurden so konzipiert, dass zum einen die Messung der Impedanz und Phase über der Zeit bei einer festen Frequenz und zum anderen Impedanzspektroskopie, d.h. die Messung bei unterschiedlichen Frequenzen in einem definierten Frequenzbereich (Frequenzsweep) über die Zeit möglich ist. Zudem sollte die kontinuierliche Messung der Temperatur im Elektrolyten während der Kupferabscheidung möglich sein.

Zum Ansteuern der Sonde, zur Auswertung und Visualisierung der Messwerte wurde eine Software mit einer graphischen Benutzeroberfläche entwickelt, welche zum Einen die Messung der Impedanz und Phase über der Zeit (Abbildung 8 oben) und zum Anderen Impedanzspektroskopie, d.h. die Messung bei einzelnen Frequenzen in einem definierten Frequenzbereich über Zeit (Abbildung 8 unten) ermöglicht. Die Ergebnisse der Impedanzspektroskopie können nach Beenden der Messung als Wasserfalldiagramme dargestellt werden, während bei der Messung bei einer festen Frequenz ein Phasensprung im Diagramm von der Software erkannt wird und als Zeit seit Beginn der Messung ausgegeben wird. Diese Zeit gilt als Indiz für das Anspringverhalten der Bäder.

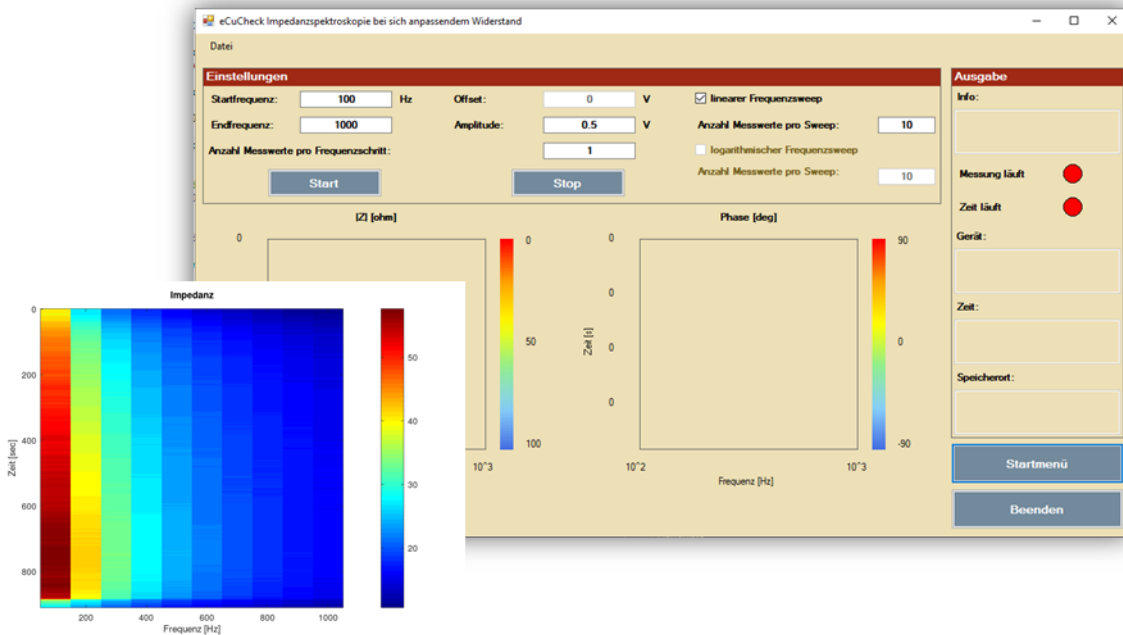
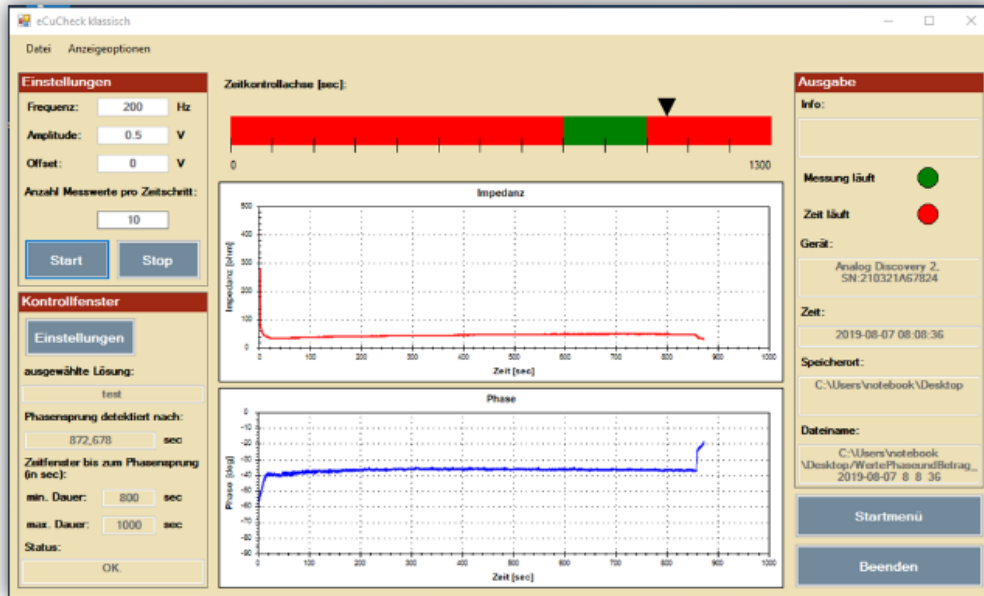


Abbildung 8: Graphische Benutzeroberfläche

Sondenhalterung mit Sonde (Sensorelement)

Um neben dem Messgerät selbst auch die Sonde und Sondenhalterung zuverlässiger und einfacher zu gestalten, wurde auch dieser Teil des Gesamtmesssystems weiterentwickelt und optimiert. Das Konzept der Sondenhalterung beinhaltet einen leiterplattenbasierten, vergossenen Aufbau, mit wiederverwendbaren Edelstahl Elektroden (Abbildung 9 links). Zusätzlich befindet sich ein digitaler Temperatursensor auf der Leiterplatte, sodass die Badtemperatur einsatznah erfasst werden kann. Die vergossene Sondenhalterung ist damit nicht mehr anfällig für das Eindringen des Elektrolyten und der damit einhergehenden Korrosion der Elektronik. Die Sonde ist ein vereinfachtes Spritzgussteil (Abbildung 9 rechts), welches von hinten an die flach ausgefrästen Elektroden angepresst wird. Die Sonde ist damit nur noch ein rechteckiges Spritzgussteil, welches vor dem Verwenden maximal einmalig laserbearbeitet werden muss

und dann sofort einsatzfähig ist. Außerdem können mit diesem Sondenprinzip unterschiedliche Kunststoffe verwendet werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit zu untersuchen, wie sich unterschiedliche Basissubstrate auf die Signale auswirken, was insbesondere bei der Metallisierung von Schaltungsträgern aus einer erweiterten Werkstoffpalette von Relevanz ist. Zudem erlaubt es, Sonden aus der aktuellen Spritzgussproduktion eines Bauteils zu verwenden, sodass auch Chargenschwankungen des Kunststoffes und das Ansprungsverhalten anhand konkreter Produktionschargen möglich werden kann. Abbildung 10 zeigt den Werkzeugeinsatz zum Spritzgießen der Sonden.

Für die Messung von Impedanz und Phase über der Zeit bei einer festen Frequenz wird eine partiell laseraktivierte Sonde eingesetzt und für Impedanzspektroskopie eine nicht laseraktivierte Sonde. Ein additiv gefertigtes Teil aus PP bildet im ersten Aufbau das Federelement, welches die Sonde an die Elektroden presst. Basierend auf dem neuen Konzept wurden Funktionsmuster des neuen Sondenhalters mit Sonde (Abbildung 11) aufgebaut.

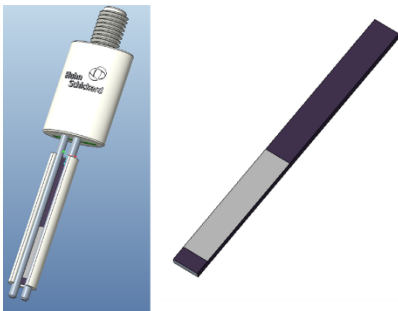


Abbildung 9: Konzept Sondenhalter und Sonde

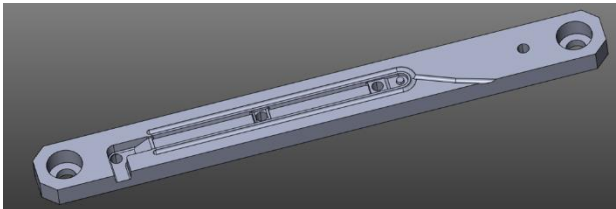


Abbildung 10: Spritzgusswerkzeugeinsatz für Sonde



Abbildung 11: Sondenhalter unvergossen (links), Sondenhalter vergossen mit Sonde (mitte), Sonde mit und ohne Laserstrukturierung (rechts)

Es zeigte sich jedoch schnell, dass eine Relaxation des additiv gefertigten PP-Federelements zu einem schlechten Kontakt zwischen der Sonde und den Elektroden führte. Versuche zur Anfertigung des Federelements aus Epoxidharz waren nicht erfolgreich, da das Material zu spröde ist und bricht. Um den Kontakt zwischen Sonde und Elektroden zu verbessern, wurde der Einsatz von Steckkontakten bei der Integration der Elektroden in die Sondenhalterung untersucht. Dazu wurden vergoldete Federkontakte verwendet (Abbildung 12). Damit konnte je-

doch keine nennenswerte Verbesserung erzielt werden, so dass dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde. Durch ein neues Klammerdesign des additiv gefertigten PP-Federelements, welches die Elektroden an geeigneten Stellen komplett umschließt und damit weniger relaxieren kann als das von einer Seite offene Klammerdesign, konnte die Kontaktierung schließlich verbessert werden (Abbildung 13).



Abbildung 12: Federkontakte integriert in Sondenhalterung



Abbildung 13: Altes und neues Klammerdesign

Verbindungs- und Schirmkonzept

Um ein optimales Schirmkonzept für die Sonde realisieren zu können, wurde versucht mit einem nachgebildeten vereinfachten Messsystem, in Form eines Plattenkondensators, ein Ersatzschaltbild für den Elektrolyten zu finden. Dazu wurden Messungen des Plattenkondensators im Elektrolyten an einem Impedanzmessplatz (100 Hz – 40 MHz) durchgeführt (Abbildung 14).



Abbildung 14: Versuch zur Ermittlung eines Ersatzschaltbilds des Elektrolyten mit Hilfe einer vereinfachten Sonde in Form eines Plattenkondensators.

Es wurde ferner versucht, die Messergebnisse in der Software ZSimDemo über ein Ersatzschaltbild zu fitten. Keines der untersuchten Ersatzschaltbilder lieferte einen zufriedenstellenden Fit auf die Messdaten, auch nicht bei einem reduzierten Frequenzbereich. Durch die hohe Komplexität des Ersatzschaltbildes des Elektrolyten, konnte kein vereinfachtes Ersatzschaltbild gefunden werden.

Deshalb wurden unterschiedliche Schirmkonzepte und Verdrahtungen mittels 2- und 4-Leitertechnik iterativ erprobt. Letztendlich wurde für die 4-Leitermesstechnik am Impedanzboard des AD2 die Wago-Klemme entfernt, sodass alle 4 Leitungen, ausgehend von den Elektroden, direkt mit dem AD2 verbunden werden konnten, siehe schematische Darstellung in Abbildung 15. Es wurde ein 8-adriges Kabel mit gemeinsamem Schirm, welcher auf GND des AD2 gelegt wurde, verwendet. Die weiteren Kabel wurden für die digitalen Signale des digitalen Temperatursensors genutzt. Die Verkabelung mittels 4-Leitermesstechnik und Schirmung wurde auch auf die bisherige Sondenhalterung übertragen.

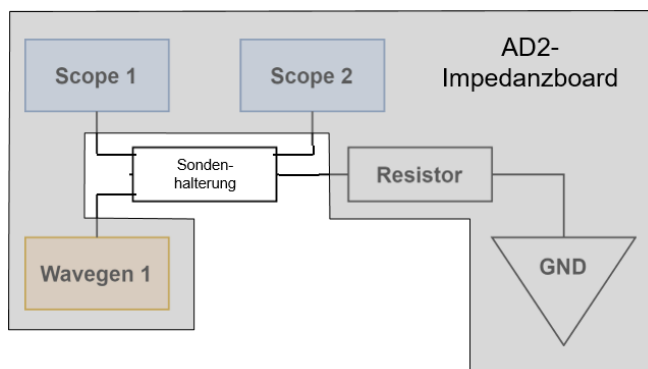


Abbildung 15: Verdrahtung der Sondenhalterung mit dem Impedanzboard des AD2 in 4-Leitermesstechnik.

Sondenhalterung mit integrierter Temperaturerfassung

Das Aufbaukonzept, basierend auf einer Leiterplatte, bietet die Möglichkeit zur Integration eines digitalen Temperatursensors in die Sondenhalterung. Hierzu wurde auf der Platine ein Temperatursensor TMP117 bestückt. Dieser wird über die digitalen Ein-/Ausgänge des AD2 als I²C-Schnittstelle ausgelesen. Diese Funktion wurde zusätzlich in die entwickelte Software integriert. Die Temperatur ist ein wesentlicher Prozessparameter bei der außenstromlosen Kupferabscheidung und hat einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis der Metallisierung, so dass durch eine kontinuierliche Temperaturmessung des Elektrolyten zusätzliche Informationen während der Prozessführung gewonnen werden können. Der integrierte Temperatursensor ermöglicht auch die Messung der Badtemperatur an verschiedenen Orten im Prozessbecken. Die Option war ursprünglich nicht geplant, wurde aber aufgrund der technologischen Relevanz zusätzlich zum ursprünglich geplanten Projektumfang umgesetzt.

Da es beim AD2 mit Impedanzboard keine Möglichkeit gibt, digitale Schnittstellen für den Temperatursensor auszulesen, wurde bei der Variante mit integriertem Temperatursensor ein eigens designtes Board eingesetzt, welches die Möglichkeit zum Einstellen des Messbereiches für die Impedanzmessung und zusätzlich die Temperaturmessung bietet (Abbildung 16). Die dazu verwendeten Pins am AD2 und deren Verwendung sind in Abbildung 17 dargestellt.

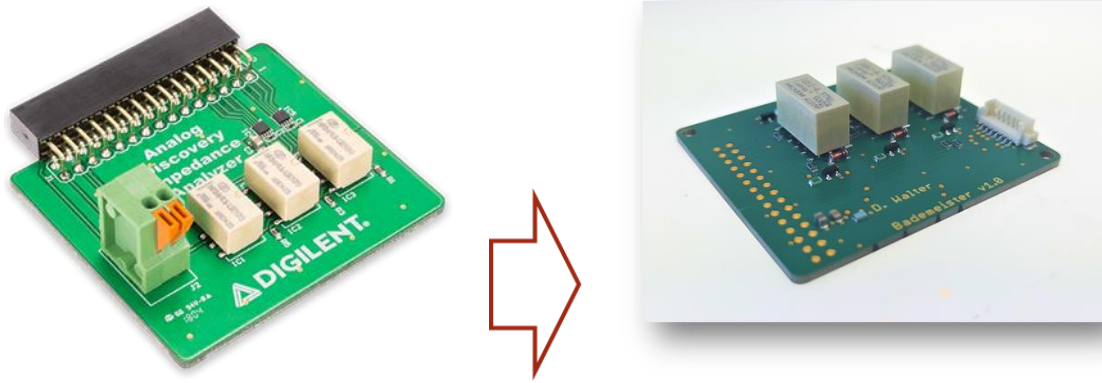


Abbildung 16: Eigenes Board.

Impedanzmessung Temperaturmessung Messbereichswahl

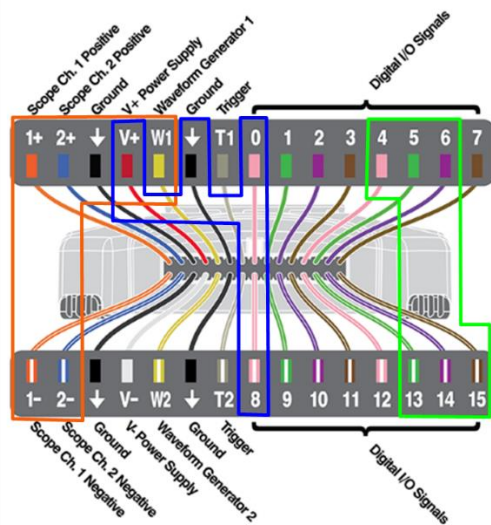


Abbildung 17: Verbindung zum AD2.

Aufbau Messsystem mit AD2 und erste Messergebnisse

Der erste Hardware-Aufbau des Messsystems im Projekt mit der bisherigen Sondenhalterung und Sonde ist in Abbildung 18 dargestellt. Der Aufbau basiert auf einem Industrie-PC mit einer rückseitigen Box mit AD2 Board und Impedanzboard. In diesem Aufbau wurde noch eine aufwändige spitzgegossene Sonde mit einer komplexen schwer abzudichtenden Sondenhalterung der ersten Generation eingesetzt. Diese erste Generation war Teil des allerersten vorhandenen experimentellen Aufbaus, welcher jedoch für den Einsatz in einer Produktionsumgebung nicht geeignet war, weshalb eine Weiterentwicklung erforderlich war.

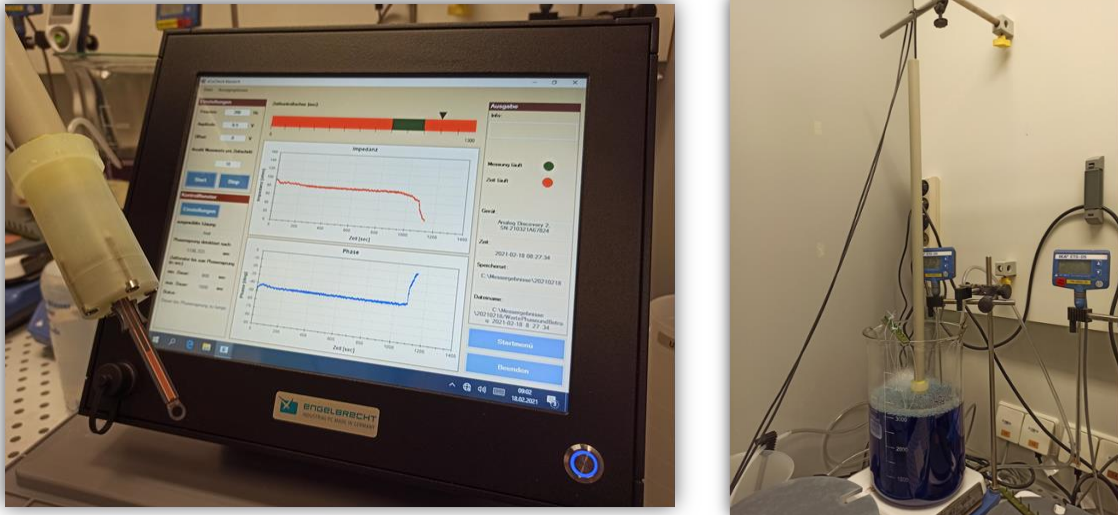


Abbildung 18: Erster Hardware-Aufbau des Messsystems.

Zusammen mit der bisher eingesetzten Sondenhalterung und Sonde konnte die Funktionsfähigkeit der neuen Hard- und Software gezeigt werden, d.h. der Phasensprung im Kupferelektrolyten kann zuverlässig ermittelt werden und auch Messungen mit Frequenzsweeps sind möglich.

Bei der Messung von Impedanz und Phase über die Zeit wurden unterschiedliche Spannungsamplituden erprobt. Es konnte gezeigt werden, dass eine Frequenz von 200 Hz in Kombination mit einer Amplitude von 500 mV gute Ergebnisse liefert. Dies entspricht auch den Einstellungen des experimentellen Aufbaus aus dem vorherigen Forschungsprojekt.

Abbildung 19 zeigt erste impedanzspektroskopische Untersuchungen mit einer nicht laseraktivierten Sonde im bisher eingesetzten Sondenhalter. Zu unterschiedlichen Zeiten wurden Veränderungen am außenstromlosen Kupferelektrolyten durchgeführt, wie z.B. die Zugabe von Komponenten oder die Einbringung von Substraten. Die vertikalen schwarzen Linien im Diagramm markieren diese Zeitpunkte und geben als kurzen Text die durchgeführte Veränderung bzw. Tätigkeit an. Abhängig von der Frequenz wurden mehr oder weniger Änderungen im Messsignal über den gesamten Verlauf beobachtet. Die Interpretation der Ergebnisse ist jedoch äußerst komplex.

Da jedoch zum Aufbau einer überarbeiteten funktionsfähigen Sondenhalterung mit Sonde ein sehr großer Mehraufwand erforderlich war, erfolgte im Projekt in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss eine Fokussierung auf die Messung der Impedanz und Phase über Zeit, so dass weitere Arbeiten zur Impedanzspektroskopie nicht durchgeführt wurden. Durch die Arbeiten im Projekt konnte jedoch die messtechnische Basis für weitere impedanzspektroskopische Untersuchungen an außenstromlosen Kupferelektrolyten gelegt werden.

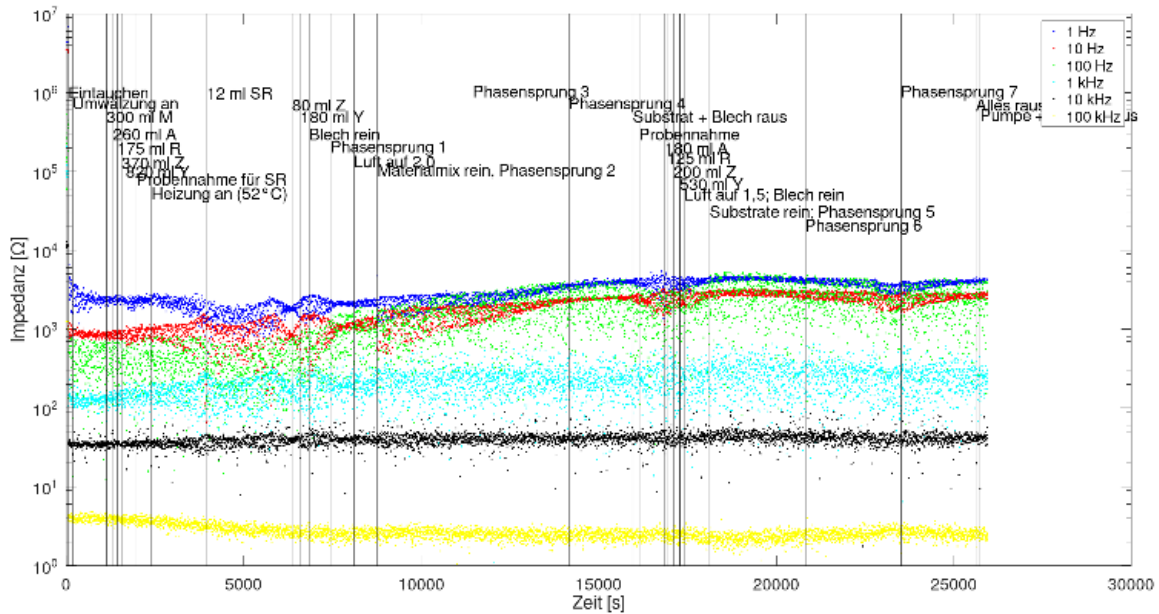


Abbildung 19: Erste impedanzspektroskopische Untersuchungen an außenstromlosen Kupferelektrolyten.

Erste Versuche mit dem neuen Sondenhalter und der neuen Sonde wurden zunächst so durchgeführt, dass Sondenhalter mit Sonde bei Raumtemperatur in ein Becherglas mit Elektrolyten getaucht und eine Impedanzmessung durchgeführt wurde. Abbildung 20 zeigt das Ergebnis dieser Messung mit einem Betrag der Impedanz von $<20 \Omega$ und einer Phase von etwa -65° . Dies entspricht der Erwartung eines zu Beginn vorwiegend kapazitiven Verhaltens der Sonde. Im Becherglas selbst kann durch die niedrige Temperatur keine Metallisierung der laseraktiven Fläche erfolgen und damit kein Phasensprung detektiert werden.

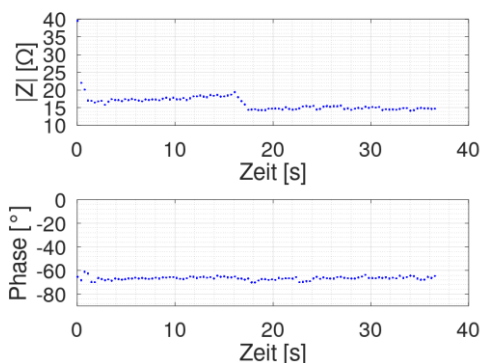


Abbildung 20: Messergebnis der neuen Sondenhalterung mit neuer Sonde im Elektrolyten im Becherglas bei Raumtemperatur.

Bei anfänglich durchgeführten Messungen im Elektrolytbad während der Kupferabscheidung konnte zunächst kein Phasensprung detektiert werden. Aufgrund der Vermutung von Kontaktproblemen zwischen Sondenhalterung und Sonde wurden verschiedene Varianten von Sondenhalterung, Sonde und Klammer untersucht. Es konnten zwar Verbesserungen der Kontaktierung zwischen Sonde und Elektrode erzielt werden, das Signalrauschen war jedoch immer noch zu hoch und der Phasensprung konnte nur unzureichend detektiert werden. Nach zahlreichen Messungen bei unterschiedlichsten Bedingungen und mit verschiedenen Sondenhaltern wurde die Software in Kombination mit der Hardware des Messsystems als Ursache für

das Rauschen identifiziert. In der Software wurde hinterlegt, den Messbereich automatisch einzustellen, um einen geeigneten Messbereich zu wählen. Dies gestaltete sich in Kombination mit der bisherigen Sondenhalterung und Sonde als unproblematisch. Mit der neuen Sondenhalterung und Sonde wurde jedoch ein ungeeigneter Messbereich eingestellt, sodass keine Detektion des Phasensprungs möglich war. Daher wurde eine Anpassung der Software vorgenommen, in welcher der Messbereich manuell durch Auswahl eines entsprechenden Messwiderstands in der Software eingestellt werden muss. Es wurden Messreihen zur Ermittlung des optimalen Messwiderstandes durchgeführt und der dabei ermittelte Widerstand in der grafischen Benutzeroberfläche voreingestellt.

Abbildung 21 zeigt das vollständig aufgebaute finale Messsystem, bestehend aus Industrie-PC mit Software, Elektronikgehäuse mit AD2 und Board für Impedanz- und Temperaturmessung sowie Sondenhalter mit integriertem Temperatursensor. Eine typische Messkurve mit Temperatur, Impedanz und Phase über der Zeit im Kupferelektrolyten ist in Abbildung 22 dargestellt. Der Phasensprung ist dabei der wesentliche Parameter für das Anspringverhalten des Kupferelektrolyten auf dem LDS-Substrat. Der Phasensprung erfolgt umso schneller, je höher die Aktivität bzw. das Anspringverhalten auf dem LDS-Substrat ist (Abbildung 23).

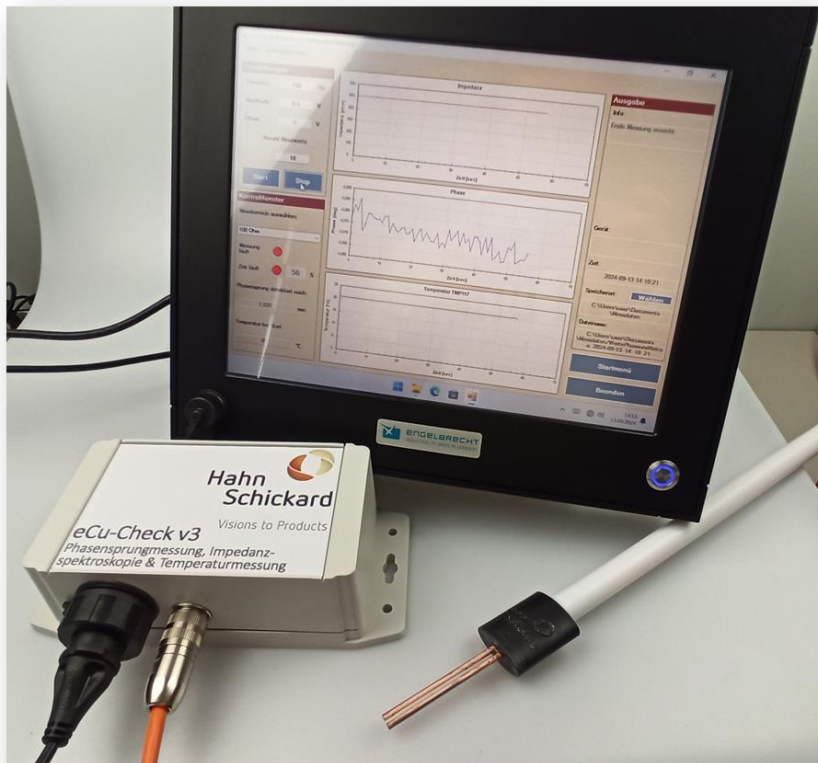


Abbildung 21: Finales Messsystem.

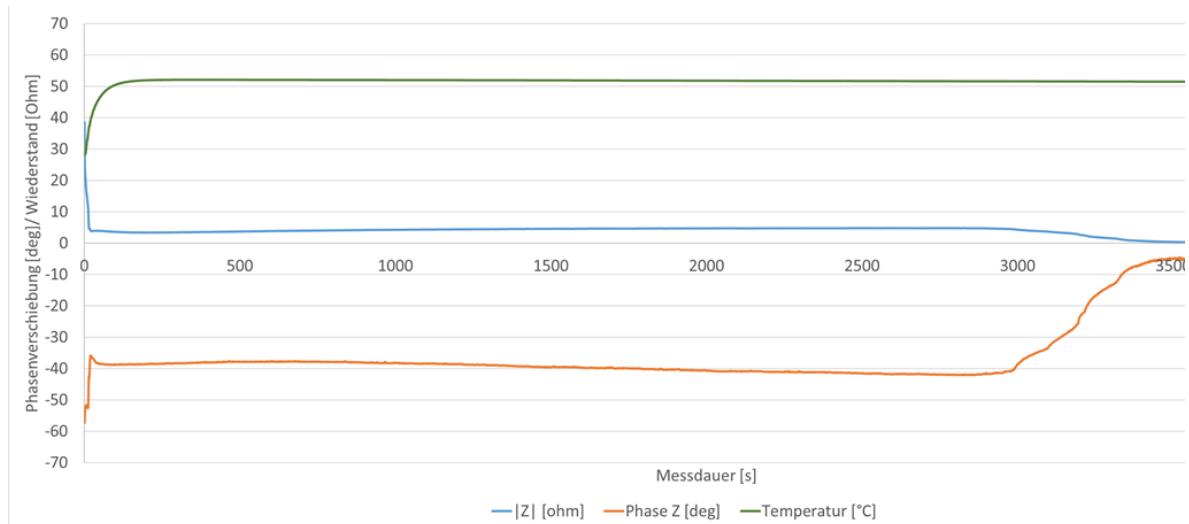


Abbildung 22: Typische Messkurve in einem Kupferelektrolyt.

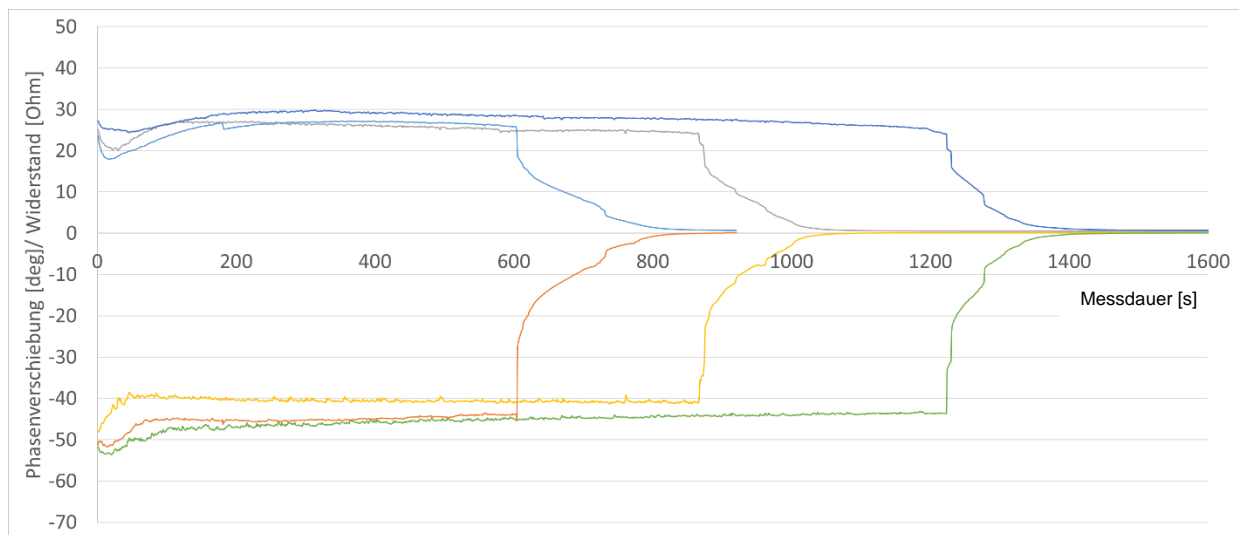


Abbildung 23: Messkurven in einem Kupferelektrolyt mit hoher (links), optimaler (Mitte) und geringer (rechts) Aktivität im Vergleich (ohne Temperaturmessung).

Querbeeinflussung von zwei Messsystemen

Um Erkenntnisse zur Badaktivität an unterschiedlichen Positionen im Elektrolytbad zu erhalten, ist der gleichzeitige Einsatz von zwei Messsystemen wünschenswert. Bisher konnte mit dem alten Sondenhalter samt Sonde an einem LCR-Meter beobachtet werden, dass sich zwei Messsonden im gleichen Elektrolytbad beeinflussen und damit die Messung stören. Zwischenzeitlich wurde dieses Phänomen nicht beobachtet, so lange eine Sonde am LCR-Meter und die zweite Sonde an einem AD2 angeschlossen war. Daher wurde der Test mit zwei Messsystemen bestehend aus jeweils einem AD2 mit neuer Sondenhalterung und neuer Sonde durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 24 zu sehen. Beim Eintauchen eines zweiten Messsystems zeigt die Phase des ersten Systems einen Sprung. Dabei spielt es keine Rolle ob GND der beiden AD2s galvanisch voneinander getrennt sind oder nicht (Test: zwei Messsysteme an einem PC vs. zwei Messsysteme an unterschiedlichen PCs).

Eintauchen eines zweiten Systems

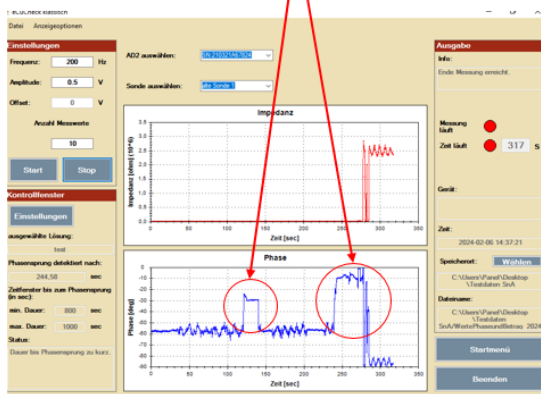


Abbildung 24: Querbeeinflussung von zwei Messsystemen (AD2 mit neuer Sondenhalterung und neuer Sonde) im Becherglas.

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass eine parallele Messung mit zwei Systemen im gleichen Bad nur möglich ist, wenn unterschiedliche Messfrequenzen gewählt werden (Abbildung 25). Bei gleichen Messfrequenzen ist eine parallele Messung aufgrund von Störungen nicht möglich. Unterschiedliche Frequenzen führen zwar zu einem größeren Signalrauschen, eine parallele Messung ist aber möglich. Somit sind parallele Messungen mit Sonden aus verschiedenen Werkstoffen oder an unterschiedlichen Orten im Bad möglich. Bei Messungen in industrienaher Umgebung konnten diese Querbeeinflussungen trotz Messung bei der gleichen Frequenz nicht mehr beobachtet werden. Eventuell hängt dies mit dem Abstand der beiden Sonden im Becken zueinander ab. Die Volumina der industriell eingesetzten Becken sind deutlich größer, womit auch ein größerer Abstand zwischen zwei Sonden vorgesehen werden kann. Die Ergebnisse sind in Kapitel 7 dargestellt.

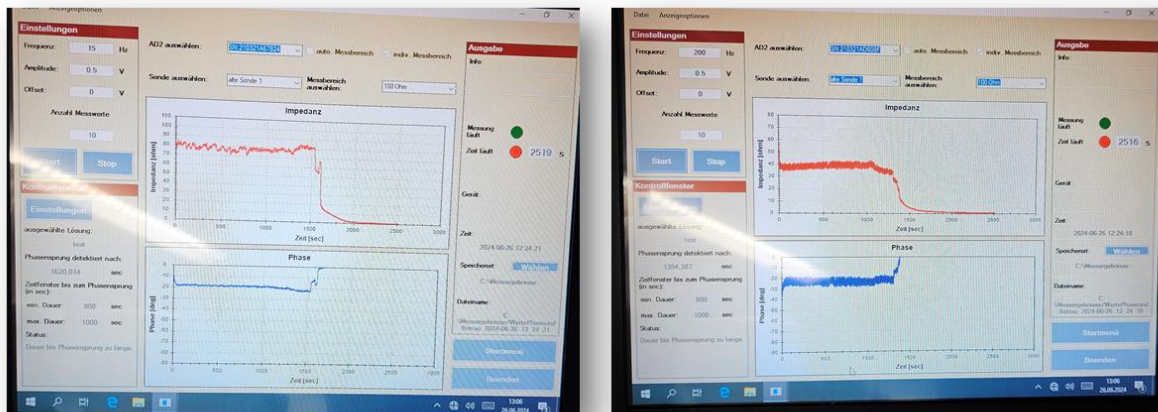


Abbildung 25: Parallele Messung bei verschiedenen Frequenzen im Vergleich.

6. Badüberwachung mittels LIBS

Auswahl geeigneter Tiegel und Einfluss auf die LIBS-Messergebnisse

Die Lösungen aus den drei spezifischen Prozessketten wurden mittels LIBS analysiert. Die Messungen wurden mit einem kommerziellen, blitzlampengepumpten Nd:YAG-Laser (INNO-LAS Laser GmbH, Spotlight 400, 6 ns, 1064 nm) durchgeführt. Zur Analyse der optischen Emissionen kam das Echelle-Spektrometersystem ESA 4000 (LLA Instruments GmbH) zum Einsatz, das das Spektrum simultan von 200 nm bis 870 nm mit einer hohen spektralen Auflösung von etwa 0,6 nm erfasst. Für die Spektrenauswertung (Software Esawin) wird auf eine umfangreiche Datenbank zurückgegriffen, die eine automatische Identifizierung relevanter atomarer Emissionslinien ermöglicht.

Bei den Aluminiumtiegeln wurde eine Energie von 50 mJ verwendet, während für die PCTG-Tiegel eine Energie von 70 mJ eingestellt wurde.

Für die ersten Versuche wurde die Oxsilan-Badlösung analysiert. Dazu wurden Verdünnungsreihen von 0-100 % mit VE-Wasser in Aluminiumtiegel hergestellt. Die relevanten Elemente sind hierbei Kupfer, Silizium, Zink und Zirkonium. Bei den LIBS-Untersuchungen wurden die Intensitäten der entsprechenden Wellenlängen dieser Elemente in Verhältnis zum Substrat Aluminium erfasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kurve schnell abflacht und die Intensität nicht linear mit dem Volumenanteil bzw. der Konzentration der Elemente korreliert. Der Grund hierfür ist die sogenannte Selbstabsorption im Plasma, die zu einer Abnahme der Intensität führen kann.

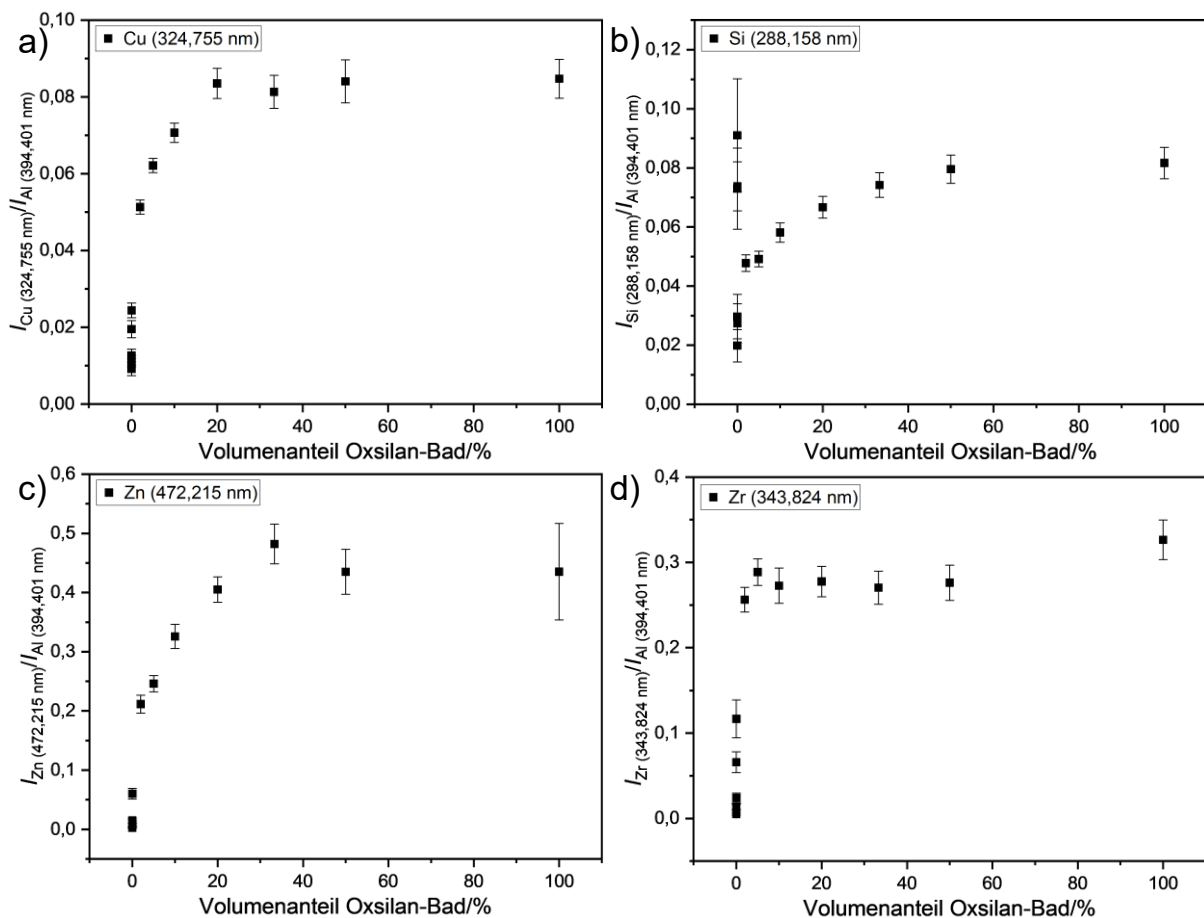


Abbildung 26: Gemessene relative LIBS-Intensitäten von Kupfer, Silizium, Zink und Zirkonium in den eingetrockneten Badlösungen von Oxsilan, bezogen auf Aluminium.

In gealterten Badlösungen kann zusätzlich Aluminium auftreten. Für die Detektion von Aluminium sollten daher neue Tiegel ausgewählt werden. Für die Untersuchung war die Auswahl geeigneter Tiegel von entscheidender Bedeutung. Zunächst kamen Aluminium-Tiegel zum Einsatz, die häufig für thermische Analysen wie die thermogravimetrische Analyse verwendet werden. Diese Tiegel bieten eine hohe Reinheit sowie Temperatur- und chemische Beständigkeit. Allerdings kann es bei dem zu überwachenden Prozess der Aluminiumvorbehandlung zu einer Verunreinigung der Badlösung mit Aluminium kommen, das nachgewiesen werden muss. Aus diesem Grund wurde nach einem alternativen Material für die Tiegel gesucht. Dementsprechend sollten die Tiegel aus keinem Material sein, das detektiert werden sollte, und die Tiegel müssen möglichst rein sein. Als Alternative zu Aluminiumtiegel wurden Tiegel aus ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) und PC (Polycarbonat) in Betracht gezogen, die eine mäßige bis gute chemische Beständigkeit aufweisen. Zudem wurden Tiegel aus PCTG (Glykol modifiziertes Polycyclohexylenedimethylterephthalat) erwogen, die eine hohe chemische Beständigkeit bieten. Besonders wichtig waren eine hohe chemische Beständigkeit gegenüber den Badlösungen und eine hohe Temperaturbeständigkeit aufgrund des Trocknungsprozesses. Die Entscheidung fiel auf PCTG, da es sowohl eine hohe chemische als auch thermische Stabilität aufweist.

Die Oberfläche der PCTG-Tiegel wurde mit einem 3D-Profilometer untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Oberfläche der Tiegel durch den 3D-Druck eine geriffelte Struktur aufweist (siehe Abbildung 27). Diese Struktur führte zu einem Höhenunterschied von etwa 60 µm.

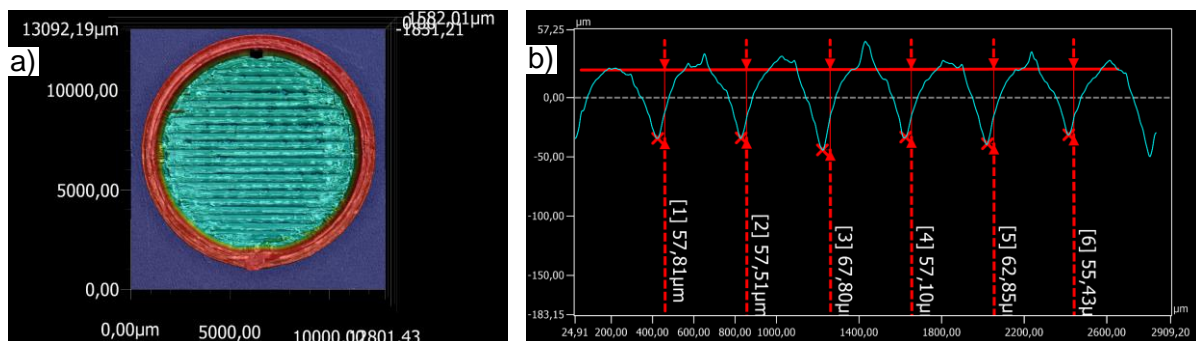


Abbildung 27: 3D-Profilometer Aufnahmen und Auswertung eines PCTG-Tiegels.

Im nächsten Schritt wurden die neu hergestellten PCTG-Tiegel mit den herkömmlichen Aluminiumtiegel verglichen. Dazu wurden verschiedene Verdünnungen der Oxsilan-Badlösung erstellt und die getrockneten Proben mittels LIBS analysiert (siehe Abbildung 28). Die Messergebnisse zeigen für beide Tiegelarten einen ähnlichen Verlauf, jedoch fällt die Zirkonium-Messung in Aluminiumtiegel negativ auf. Die PCTG-Tiegel bieten eine bessere Korrelation zwischen dem Volumenanteil der Oxsilan-Badlösung und der theoretischen Elementkonzentration. Dies könnte auf die durch den 3D-Druck entstehende Strukturierung der Tiegel zurückzuführen sein, die eine gleichmäßigere Trocknung im Vergleich zu Aluminiumtiegel fördert. Darüber hinaus sind die PCTG-Tiegel schnell und kostengünstig herstellbar. Ein weiterer Vorteil ist die Flexibilität in der Geometrie der Tiegel. Im Vergleich zu Aluminiumtiegel konnten deutlich größere PCTG-Tiegel gedruckt werden, was die Analyse größerer Volumina und die Detektion niedrigerer Konzentrationen ermöglicht.

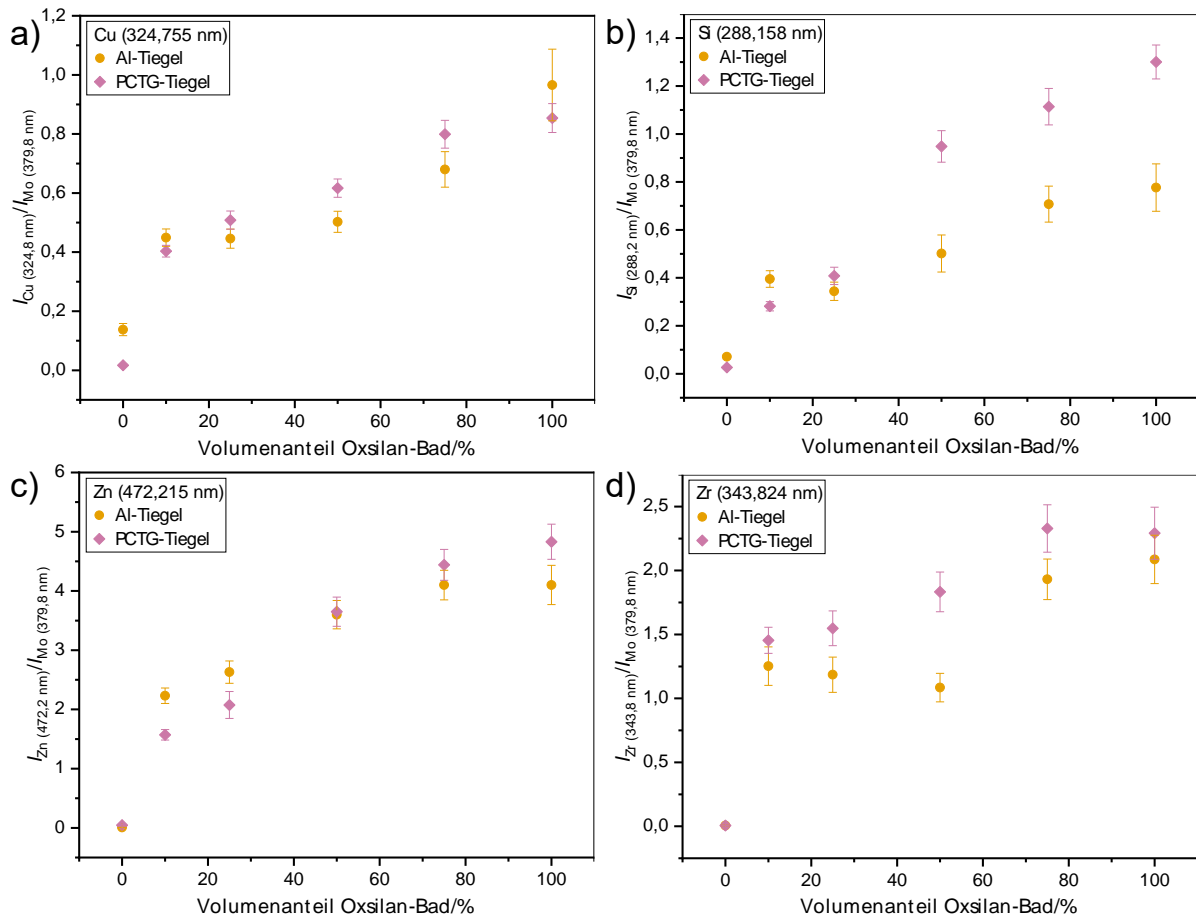


Abbildung 28: LIBS-Messergebnisse relativ zu Molybdän aus verschiedenen Verdünnungen der Oxsilan-Badlösungen. Die Proben wurden entweder in Aluminiumtiegel oder in PCTG-Tiegeln gefüllt und getrocknet.

Automatisierte Flüssigkeitsabgabe vs. manuelle und Einfluss auf die LIBS-Messergebnisse

Ein weiterer Aspekt der Probenherstellung ist die Flüssigkeitsabgabe in die Tiegel. Wie bereits erwähnt können die Proben auf mehrere Wege hergestellt werden. Die Flüssigkeiten können manuell mit einer Pipette in die Tiegel gefüllt werden. Für die automatisierte Verdünnung und Flüssigkeitsabgabe kann die sogenannte Liquid Station verwendet werden. Um die Verlässlichkeit der Methoden zu untersuchen, wurden Proben aus der Oxsilan-Badlösung auf drei Arten hergestellt: die Flüssigkeiten wurden direkt in die Pipette gefüllt (Pipette), es wurde eine Vorverdünnung hergestellt und die Lösungen anschließend entweder mit der Liquid-Station (Vorverdünnt + LS) oder mit einer Pipette (Vorverdünnt + Pipette) in die Tiegel gegeben. In Abbildung 29 sind die Ergebnisse aus den LIBS-Messungen der eingetrockneten Proben zu sehen. Insgesamt ist, wie erwartet, eine höhere relative Intensität mit steigendem Volumenanteil der Badlösung zu sehen. Außerdem sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden zu erkennen.

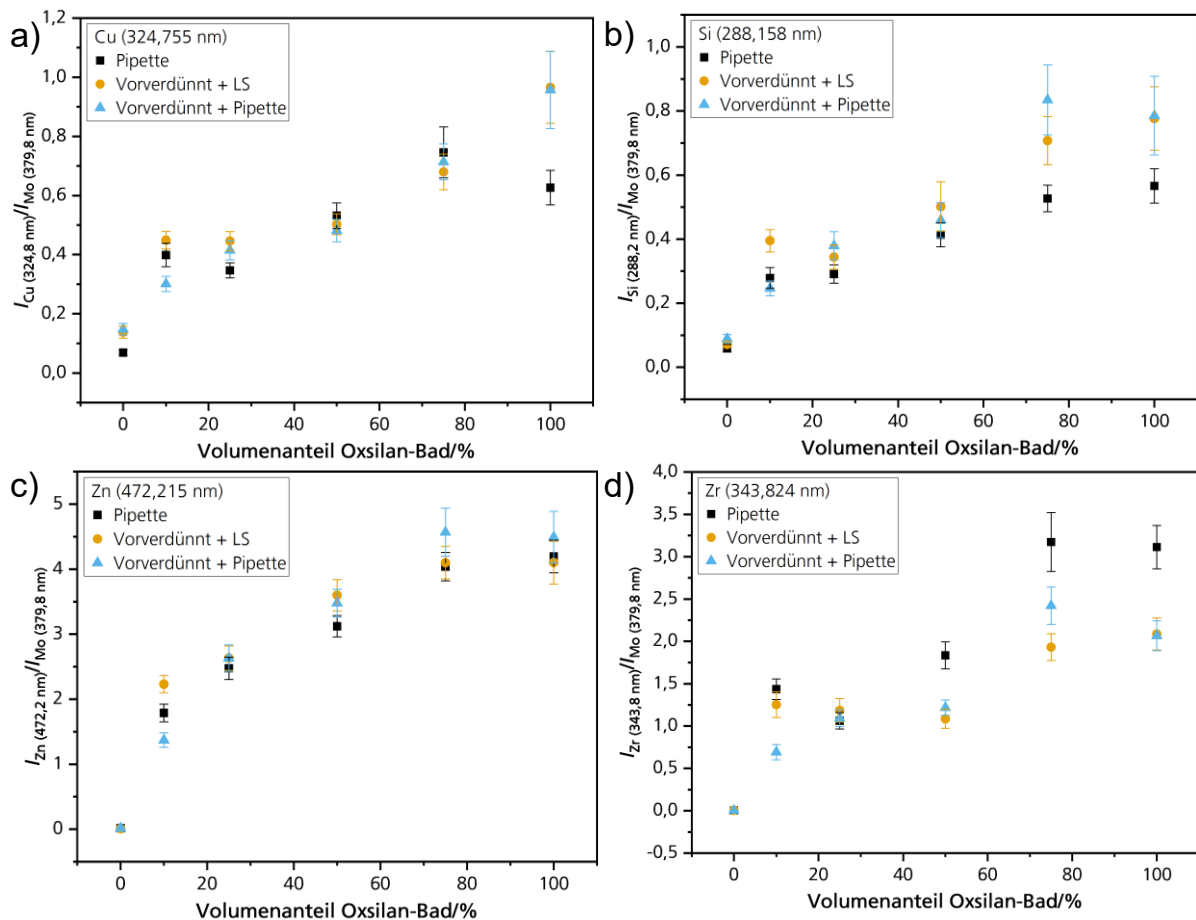


Abbildung 29: LIBS-Messergebnisse relativ zu Molybdän an eingetrockneten Proben, die mit verschiedenen Methoden hergestellt wurden.

Badüberwachung von BONDERITE mit LIBS

Neben den Oxilan-Badlösungen wurde eine weitere Badlösung für den ersten Prozess der Konversionsschichten zur Oberflächenvorbehandlung ausgewählt. Bei BONDERITE von Henkel sind die relevanten Elemente Titan und bei gealterten Badlösungen zusätzlich Aluminium. Entsprechend wurden sowohl eine neu angesetzte Badlösung ohne Aluminium (BONDERITE Fresh) als auch eine Badlösung, der Aluminium hinzugefügt wurde, (BONDERITE Aged) untersucht. In Abbildung 30 sind die Messergebnisse der LIBS-Untersuchungen der Verdünnungsreihen für beide Proben dargestellt. Ein zentraler Aspekt ist die Möglichkeit der Aluminiumdetektion mit den neuen Tiegel aus PCTG. In Abbildung 30a) und b) sind die Spektren der reinen BONDERITE Fresh bzw. Aged Lösungen dargestellt. Alle relevanten Elemente können detektiert werden. Bemerkenswert ist, dass in BONDERITE Fresh bei der Wellenlänge von 394,4 nm, wo Aluminium normalerweise detektiert wird, kein eindeutiges Signal zu erkennen ist. Dies wird durch den Vergleich der Messergebnisse der beiden Lösungen in Abbildung 30c) und d) verdeutlicht. Während in BONDERITE Aged bei höheren großenteils in einem Bereich zwischen 2,5 und 4 schwankt, ist in der Fresh-Lösung kein Aluminium detektierbar. Der Titananteil ist in BONDERITE Fresh höher als in BONDERITE Aged, was sich in einer höheren relativen Intensität widerspiegelt.

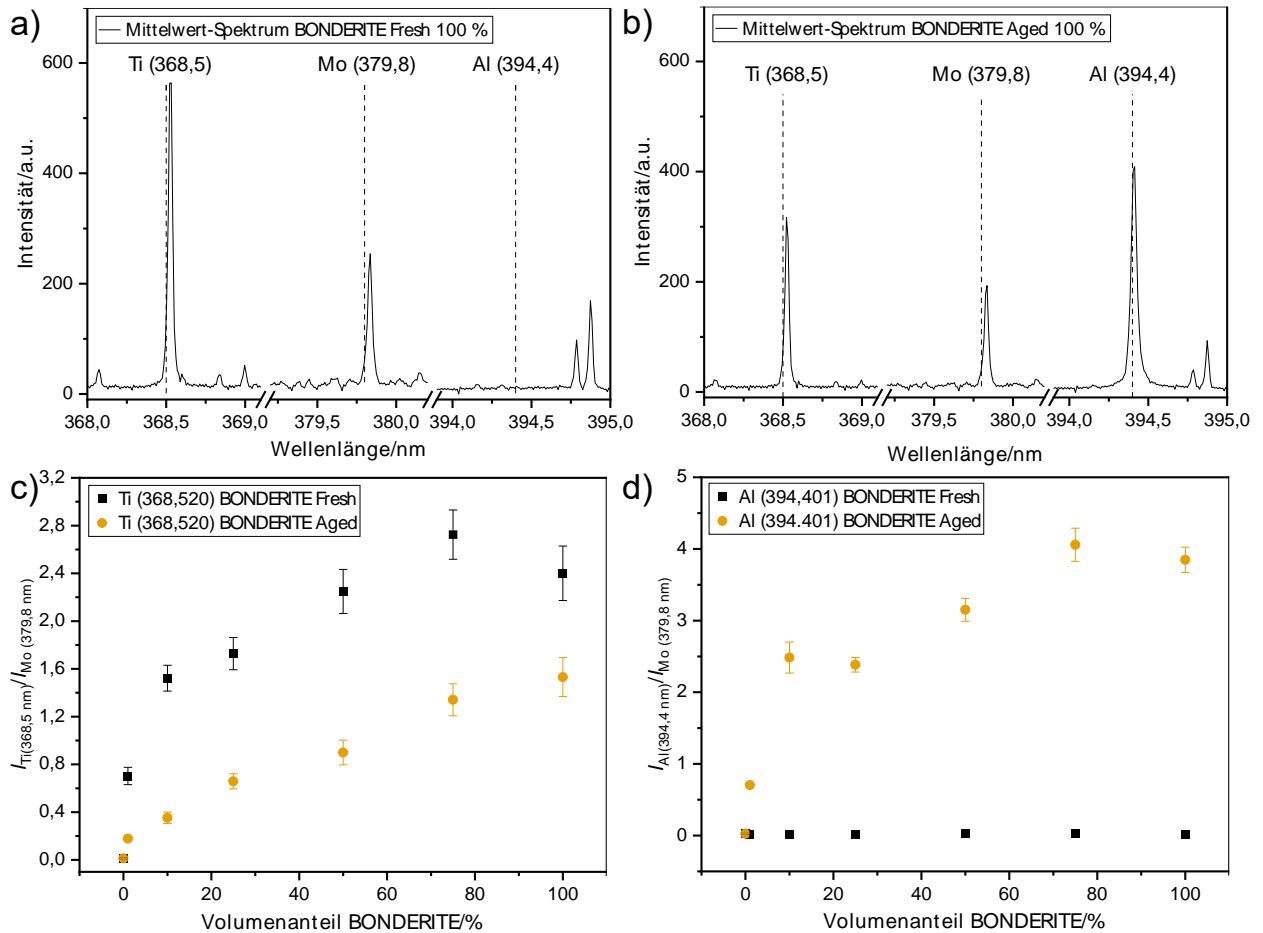


Abbildung 30: LIBS-Messergebnisse relativ zu Molybdän an getrockneten Proben der BONDERRITE-Badlösung in verschiedenen Konzentrationen.

Zur Untersuchung der Schichthomogenität wurden Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie durchgeführt. Mehrere Proben mit BONDERRITE wurden analysiert. Die Ergebnisse der Elementverteilungen in Abbildung 31 zeigen, dass die Elemente überwiegend homogen verteilt sind. Die Schichten setzen sich überwiegend aus den Matrixelementen der Badlösung zusammen, während die interessierenden Elemente – Titan, Aluminium und Molybdän – nur in geringen Mengen vorhanden sind. Dies erschwert eine präzise Analyse der Elementverteilung, weshalb die Ergebnisse der EDX-Analysen mit Vorsicht interpretiert werden sollten.

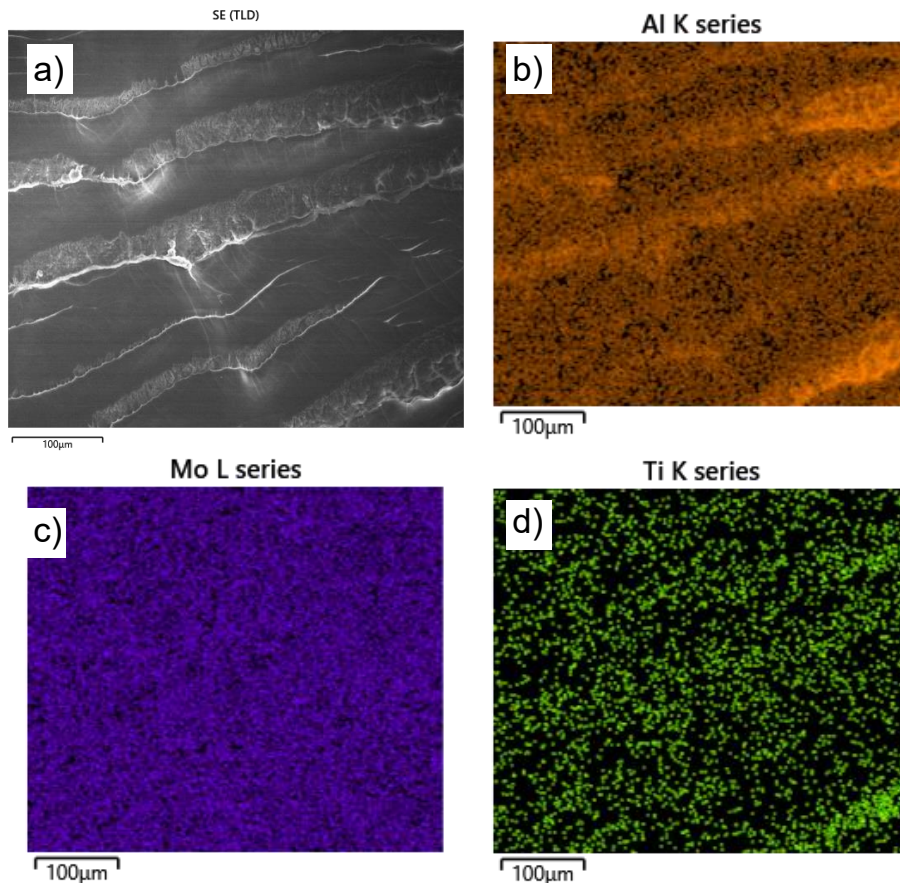


Abbildung 31: REM/EDX Analyseergebnisse einer eingetrockneten BONDERITE-Probe.

Überwachung von Bädern für die Metallisierung von 3D-Schaltungsträgern und für die Galvanoformung für optische Systeme mit LIBS

Neben den Badlösungen für die Aluminiumvorbehandlung wurden mehrere unterschiedliche Elektrolyte untersucht. Dazu zählen zwei Goldelektrolyte (Aurol und Gobright TWX-40), ein Palladiumelektrolyt (Altarea TPG-39) und ein galvanischer Nickelelektrolyt (LECTRO NIC 10-03).

Eine Herausforderung bleibt die Probenherstellung. Die Elektrolyte verhalten sich beim Trocknen deutlich anders als die Vorbehandlungsbäder. Beim Eintrocknen bildete sich eine gelartige Substanz, was bei allen Elektrolyten beobachtet wurde. Abbildung 32 zeigt beispielhaft die eingetrockneten Proben von Aurol und LECTRO. Obwohl LIBS-Untersuchungen durchgeführt werden konnten, wurden diese durch die Gelbildung erschwert. Eine mögliche Lösung könnte die starke Verdünnung der Lösungen sein. Mit einer automatisierten Probenvorbereitung, wie sie die Liquid Station bietet, könnte die Lösung so weit verdünnt werden, dass keine Gelbildung mehr auftritt.



Abbildung 32: Eingetrocknete Proben von Aurol und LECTRO NIC nach dem Erwärmen mit einem IR-Strahler.

Beim Palladiumelektrolyt TPG-39 wurden zusätzlich zwei Proben mit 5 bzw. 10 mg/l Kupfer angereichert. Für die Untersuchung wurden die Elektrolyte unverdünnt in Aluminiumtiegel gefüllt, eingetrocknet und anschließend mit LIBS analysiert (siehe Abbildung 33). Die beiden relevanten Elemente Kupfer und Palladium konnten eindeutig identifiziert werden. Zudem war es möglich, die drei TPG-39-Proben anhand ihres Kupfergehalts mittels LIBS eindeutig zu unterscheiden.

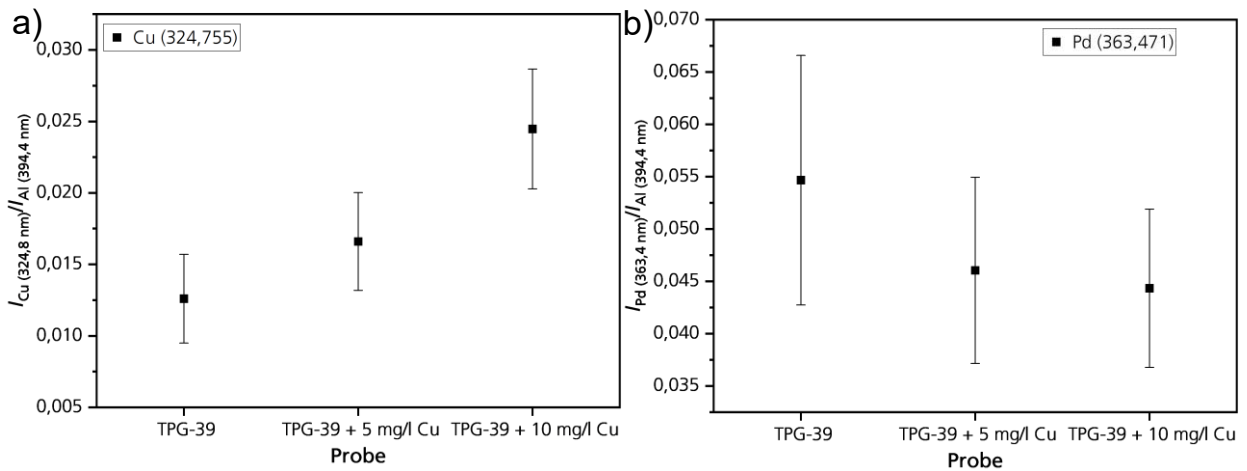


Abbildung 33: LIBS-Messergebnisse bezogen auf Molybdän von eingetrockneten TPG-39-Proben mit unterschiedlichem Kupfergehalt.

Von dem Tauchgold Aurol wurden sowohl eine frisch angesetzte (Fresh) als auch eine gealterte Probe (Aged) in drei unterschiedlichen Verdünnungen untersucht. In Aurol Fresh ist im Vergleich zur Aged-Probe mehr Gold vorhanden, jedoch deutlich weniger Nickel und kein Kupfer.

Abbildung 34 zeigt die Messergebnisse der LIBS-Untersuchungen. Die relativen Intensitäten steigen erwartungsgemäß mit einem höheren Anteil des Elektrolyten. Interessanterweise ist die relative Intensität von Gold in der Aged-Probe höher, obwohl der tatsächliche Goldgehalt niedriger ist. Dies könnte auf Ablagerungseffekte im Aurol-Behälter zurückzuführen sein, die zu einer geringeren Konzentration bei der Probenentnahme führen. Die relativen Intensitäten von Kupfer stimmen mit den erwarteten Ergebnissen überein. In der Fresh-Probe zeigt sich keine Korrelation zwischen dem Nickelgehalt und dem Volumenanteil von Aurol, was darauf hindeutet, dass die Nickelmenge zu gering ist, um eine aussagekräftige Detektion mit LIBS zu ermöglichen.

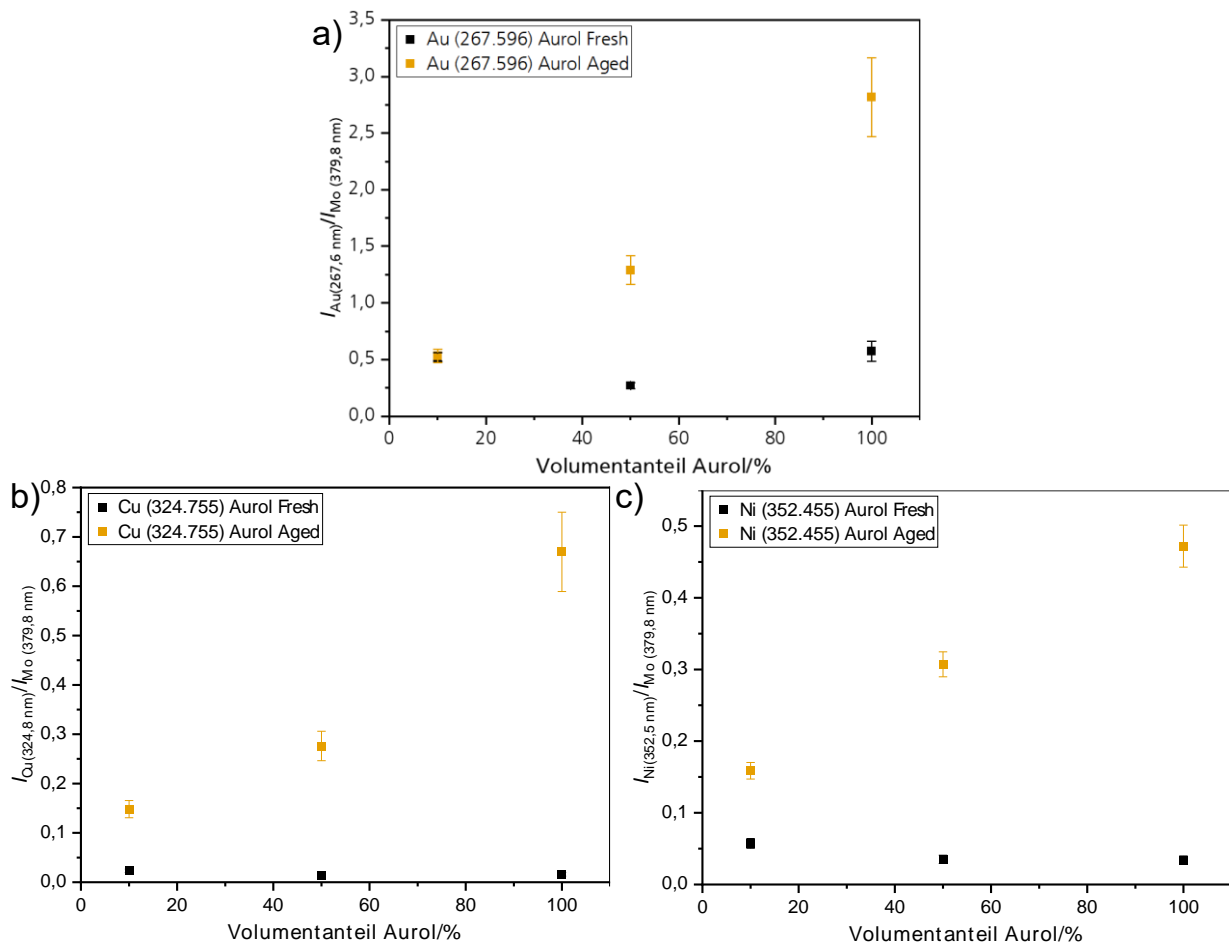


Abbildung 34: LIBS-Messergebnisse relativ zu Molybdän der eingetrockneten Aurol Proben.

Überwachung von Oxsilan direkt von der Flüssigkeit mit LIBS

Ein alternativer Ansatz bestand darin, die Flüssigkeit direkt mittels LIBS zu messen. Diese Messungen wurden in einem offenen Aufbau vorgenommen. Im Gegensatz zu den Messungen der Schichten in den Tiegeln wurde für die Flüssigkeitsmessung eine Laserwellenlänge von 532 nm gewählt. Diese Wellenlänge bietet aufgrund der geringeren Wasserabsorption im Vergleich zu 1064 nm bessere Messergebnisse. Zudem wurden statt einem zwei Laserpulse eingesetzt: Der erste Impuls induziert die Bildung von Blasen, während der zweite Impuls ein Plasma erzeugt. Der Laserstrahl wurde auf ein Metalltarget innerhalb der Flüssigkeit fokussiert, um diese in einen Plasmazustand zu versetzen. Die Verwendung eines Metalltargets erwies

sich als vorteilhaft, da es eine präzise Fokussierung der optischen Komponenten ermöglicht. Ein Teil des Aufbaus ist in Abbildung 35 dargestellt.

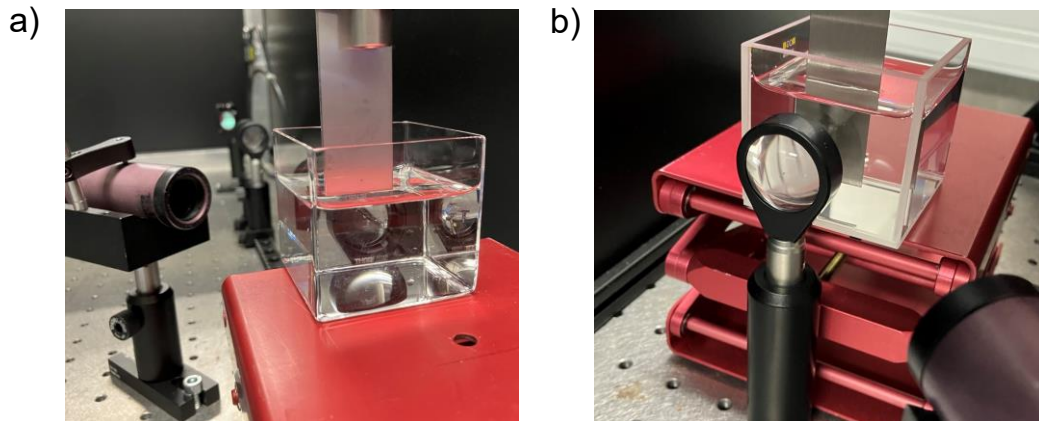


Abbildung 35: Aufbau zur Messung von Flüssigkeiten mit LIBS: Linsen fokussieren den Laserstrahl auf ein Metalltarget in der Badlösung. Die emittierte Strahlung wird über eine optische Faser zum Spektrometer geleitet, wo die Plasmastrahlung analysiert wird.

Mit diesem Aufbau wurde die Oxsilan-Badlösung untersucht, wobei zwei verschiedene Metall-Targets, Aluminium und Stahl, verwendet wurden. Die gemessenen Spektren sind in Abbildung 36 dargestellt. Von den relevanten Elementen – Kupfer, Silizium, Zink und Zirkonium – konnte lediglich Zink nicht detektiert werden. Es wurden nur absolute Intensitäten gemessen, da es an einer Referenz für relative Intensitäten fehlte. Eine mögliche Lösung könnte die Zugabe eines Standards sein, ähnlich wie bei den Messungen der Schichten in den Tiegel. Es ist jedoch wichtig, die Flüssigkeit in Bewegung zu halten, um eine homogene Mischung zu gewährleisten; andernfalls sind die Ergebnisse nur für den lokalen Messpunkt gültig. Diese Strömung erschwert jedoch die Messung, da die Fokussierung des Lasers deutlich anspruchsvoller wird. Zudem wurde die Optik speziell an die Eigenschaften der Badlösung angepasst. Änderungen in der chemischen Zusammensetzung der Lösung können die Messung beeinflussen.

Insgesamt ist somit möglich, einen Großteil der relevanten Elemente zu detektieren, allerdings ist der Messprozess mit sehr viel Aufwand verbunden. Um die LIBS-Messung von Flüssigkeiten zu einer in-line-fähigen Anwendung zu entwickeln, ist noch erhebliche Forschungsarbeit erforderlich.

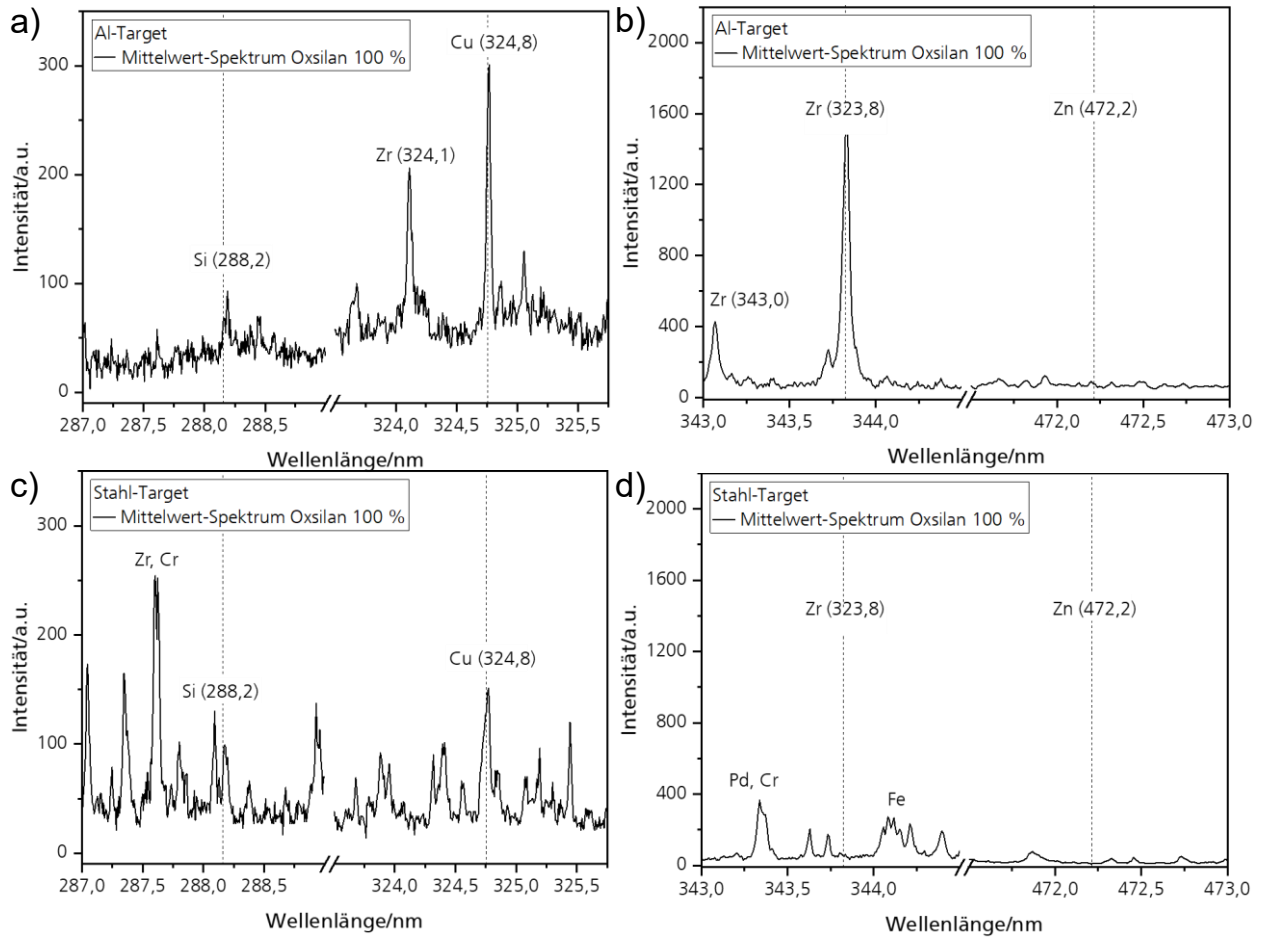


Abbildung 36: Messergebnisse der LIBS-Messungen der Oxsilan-Badlösung.

7. Badüberwachung in produktionsnaher Demonstrationsumgebung

Impedanzbasierte Messmethode

Mit dem aufgebauten Messsystem zur Überwachung des Kupferelektrolyten wurden in produktionsnaher Umgebung bei einem Mitglied des projektbegleitenden Ausschuss Messungen durchgeführt (Abbildung 37). Die Inline-Fähigkeit der Messmethode sowie die schnelle Ergebnisdarstellung konnte grundsätzlich gezeigt werden. In der Realität auftretende Abweichungen konnten detektiert werden. Es konnten keine gegenseitigen Beeinträchtigungen zweier Messsysteme bei der Messung in produktionsnaher Umgebung festgestellt werden.



Abbildung 37: Einsatz des Messsystems zur Überwachung des Kupferelektrolyten in produktionsnaher Umgebung.



Abbildung 38: Parallele Messung in industrieller Umgebung

Mit zwei Systemen in einem Prozessbecken wurden verschiedene Messungen durchgeführt (Abbildung 38). Dabei war ein System mit integrierter Hardware für den Temperatursensor ausgestattet:

- Parallele Messung mit Sonden aus dem selben Kunststoff mit gleicher Vorbehandlung
- Parallele Messung mit Sonden aus unterschiedlichen Kunststoffen mit gleicher Vorbehandlung
- Parallele Messung mit Sonden aus dem selben Kunststoff mit unterschiedlicher Vorbehandlung

Eine parallele Messungen mit 2 Systemen mit jeweils einer Sonde aus dem Thermoplasten LCP zeigte nahezu identische Phasensprünge (Sonde LCP1: 2325 s, Sonde LCP2: 2331 s). Zudem zeigen die Diagramme, dass die Elektrolytttemperatur während der Messung konstant war.

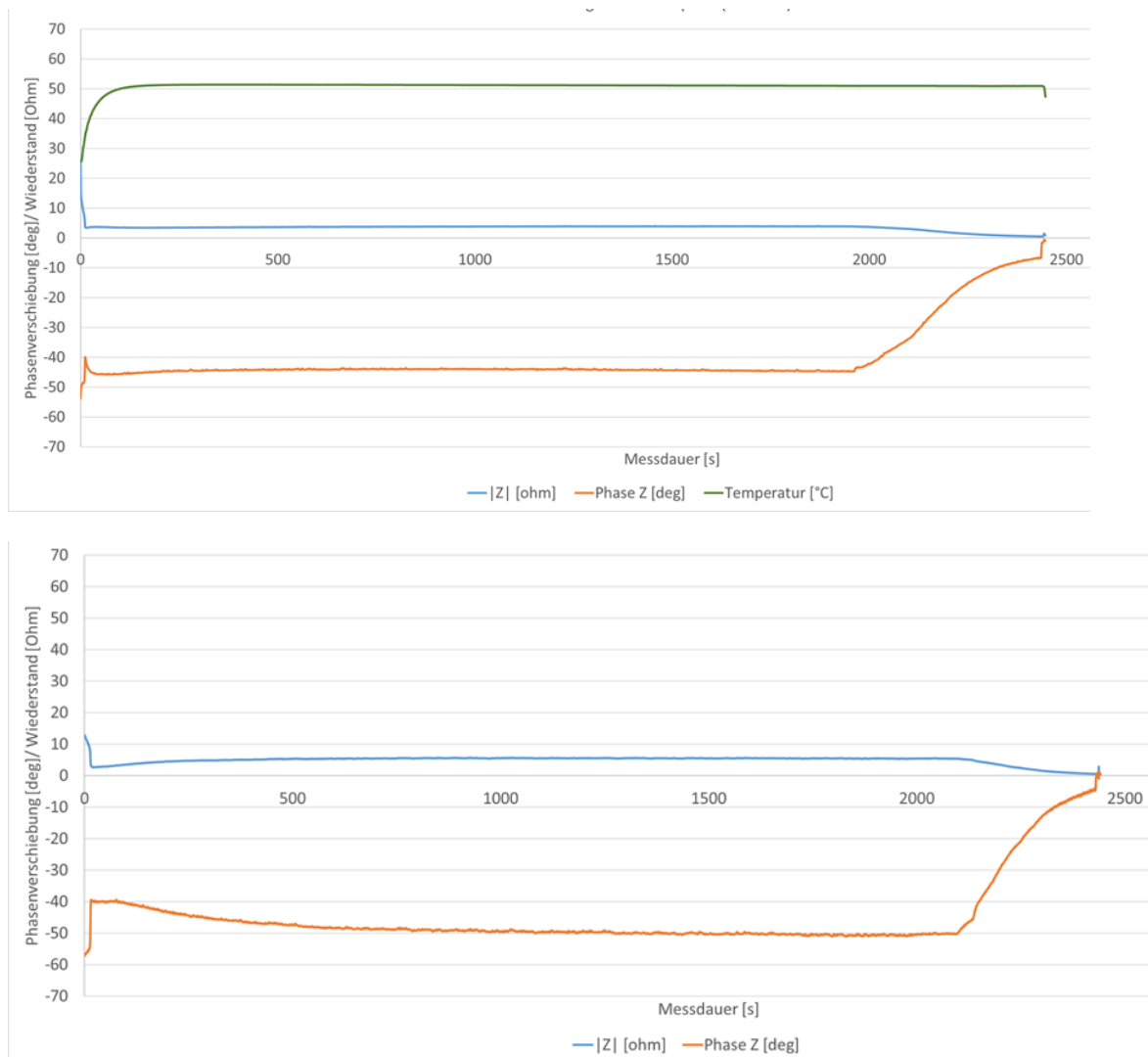


Abbildung 39: Parallele Messung mit Sonden aus gleichen Thermoplasten

Eine parallele Messungen mit 2 Systemen mit jeweils einer Sonde aus dem Thermoplasten PBT und PEEK zeigte deutlich unterschiedliche Phasensprünge (Sonde PBT: 1700 s, Sonde PEEK: 2782 s). Die Messergebnisse spiegeln auch die Beobachtungen aus der Praxis wieder, dass die Kupferabscheidung auf laserdirektstrukturierten PBT-Bauteilen schneller als auf laserdirektstrukturierten PEEK-Bauteilen anspringt.

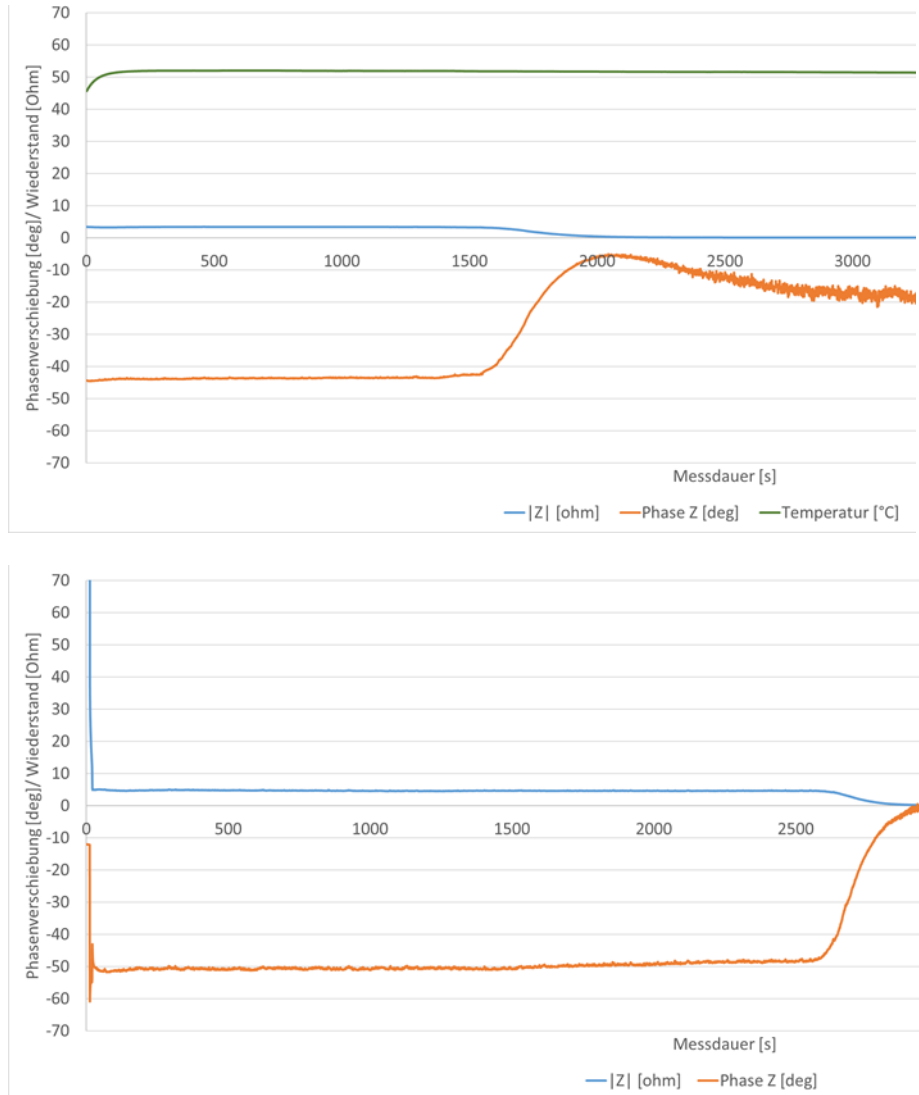


Abbildung 40: Parallele Messung mit Sonden aus verschiedenen Thermoplasten

Der Einfluss einer Vorbehandlung der laseraktivierten Sonde ist durch eine parallele Messungen mit 2 Systemen am Beispiel von Sonden aus dem Thermoplasten LCP erkennbar (Sonde mit Vorbehandlung: 1404 s, Sonde ohne Vorbehandlung: 2219 s). Auch diese Messergebnisse korrelieren mit den Beobachtungen aus der Praxis, dass durch die Vorbehandlung der laserdirektsrukturierten Substrate die Kupferabscheidung schneller anspringt.

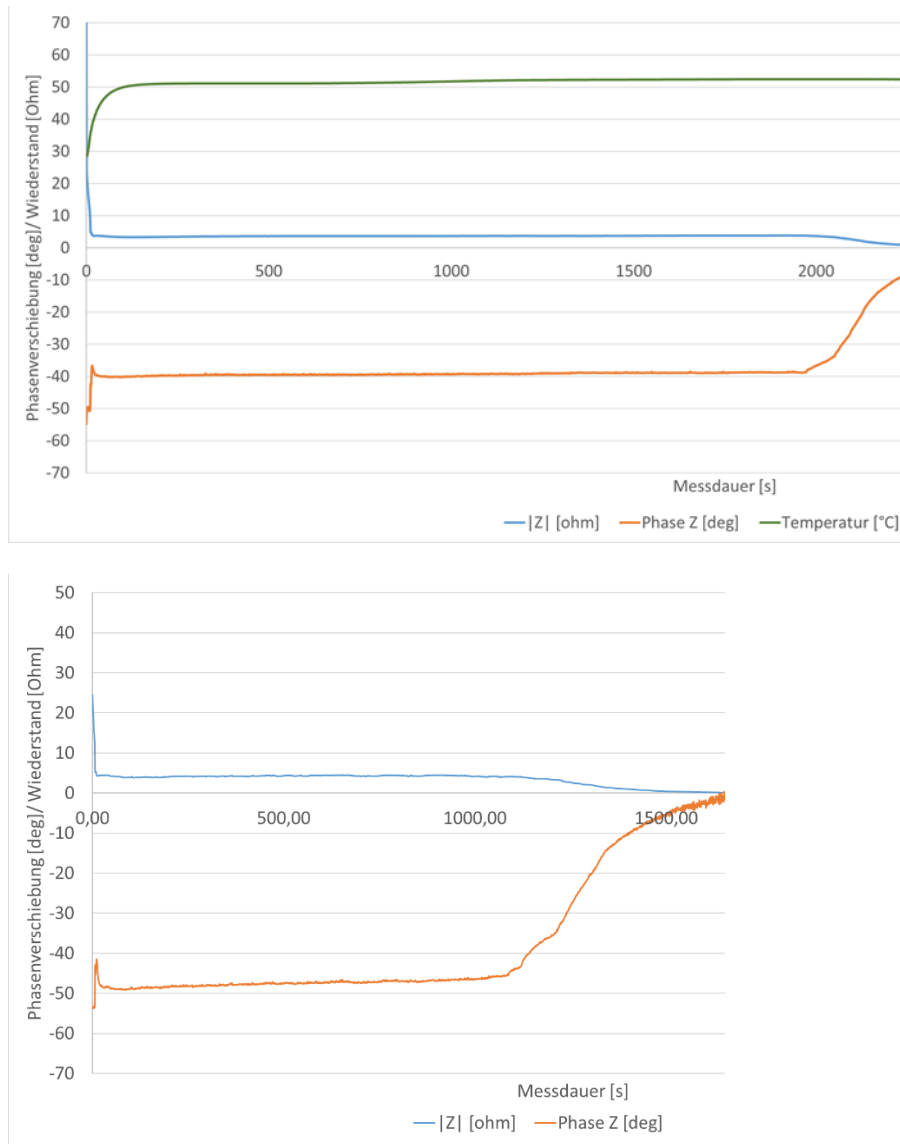


Abbildung 41: Parallele Messung mit unterschiedlich vorbehandelten Sonden

Badüberwachung mittels LIBS

In der Produktion war ein direkter Messaufbau nicht möglich, weshalb in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss möglichst realitätsnahe Proben untersucht wurden. Henkel stellte eine Konzentrationsreihe von BONDERITE bereit, die sich im Bereich der in der Anwendung befindlichen Konzentrationen bewegen. Die Probennummern 1-5 korrelieren dabei mit der Konzentration an Titan. Aluminium liegt wie bei den Proben zuvor nur in den Aged-Proben vor, wobei die Konzentration in diesen konstant ist.

In Abbildung 42 sind die LIBS Messergebnisse für die Konzentrationsreihe BONDERITE Fresh dargestellt. Die Analyse ergab eine gute Korrelation zwischen den Messergebnissen und der Konzentration für Titan. Die höchste Konzentration liegt etwas niedriger als erwartet, möglicherweise aufgrund der Selbstabsorption des Plasmas. Neben 394,4 nm ist 396,2 nm eine weitere relevante und charakteristische Wellenlänge für Aluminium. Jedoch konnte bei beiden Wellenlängen kein eindeutiges Signal detektiert werden, dazu muss der Peak mindestens dreimal so hoch sein wie das Rauschen.

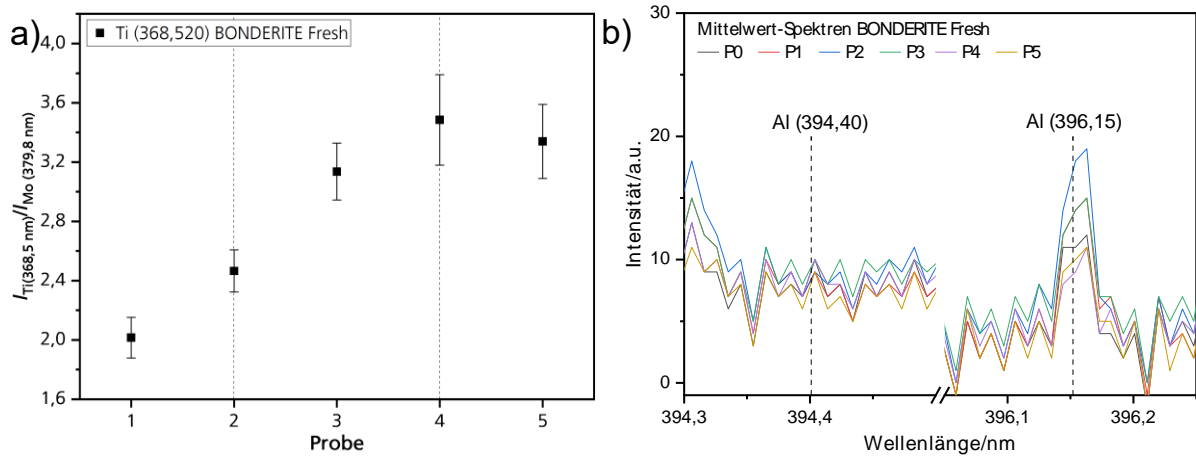


Abbildung 42: LIBS-Messergebnisse bezogen auf Molybdän der Konzentrationsreihe von BONDERITE Fresh.

Ähnlich wie bei den Fresh-Proben korrelieren auch die gemessenen relativen Intensitäten mit den Titankonzentrationen (siehe Abbildung 43). Lediglich die niedrigste Konzentration weicht von dem ansonsten sehr guten linearen Verhalten ab. Für Aluminium, das eigentlich eine konstante Konzentration aufweist, ist ebenfalls ein Trend zu höheren relativen Intensitäten mit steigender Probennummer erkennbar. Dies könnte auf eine Reaktion mit der Badlösung bzw. dem Molybdän-Standard oder auf die Selbstabsorption des Plasmas infolge der hohen Konzentration zurückzuführen sein. Eine mögliche Lösung wäre die vorherige Verdünnung der Proben, zum Beispiel mit der Liquid Station.

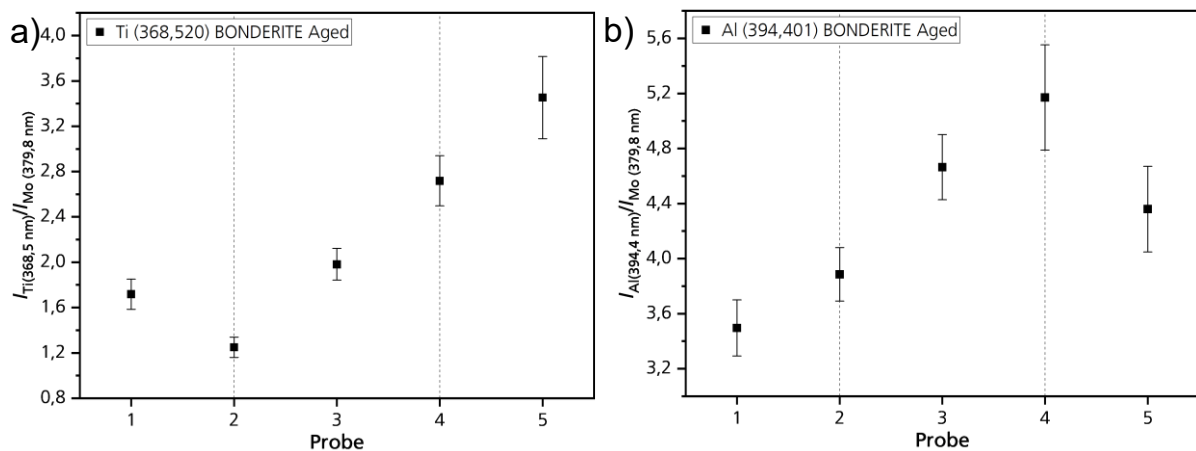


Abbildung 43: LIBS-Messergebnisse relativ zu Molybdän der Konzentrationsreihe von BONDERITE Aged.

Sowohl bei BONDERITE Fresh als auch bei Aged konnte jeweils eine gute Korrelation mit der Konzentration festgestellt werden, insbesondere im in der Praxis relevanten Bereich der Proben 2 bis 4. Mit der Verwendung der neu entwickelten PCTG-Tiegel kann Aluminium eindeutig nachgewiesen werden. Allerdings ist bei höheren Konzentrationen an Aluminium beim BONDERITE eine Verdünnung durchzuführen.

8. Richtlinien für den praxisnahen Einsatz der Messmethoden

Das aufgebaute Messsystem mit der impedanzbasierten Messmethode eignet sich zur Bestimmung der Badaktivität von außenstromlosen Kupferbädern bzw. zur Bestimmung von deren Anspringverhalten auf laserdirektstrukturierten Substraten für 3D-Schaltungsträger. Dadurch wird der praxisorientierte Anwender in die Lage versetzt, auf Veränderungen der Badaktivität schnell reagieren zu können, indem beispielsweise Prozessparameter wie die Badtemperatur entsprechend angepasst werden, so dass eine kontinuierliche Prozessierung der 3D-Schaltungsträger im optimalen Arbeitsbereich des Kupferelektrolyten möglich ist. Zusätzlich zu den standardmäßig durchgeführten Analysen von z.B. Kupfer, Reduktionsmittel und Alkali oder der Dichtebestimmung ermöglicht die impedanzbasierte Messmethode eine erweiterte Qualitätssicherung bei der Herstellung von 3D-Schaltungsträgern.

Weiterhin wird dem Anwender eine Methode an die Hand gegeben, die das Anspringverhalten von unterschiedlichen laserdirektstrukturierten Substratmaterialien im außenstromlosen Kupferelektrolyten charakterisiert, was dem Anwender eine substratspezifische Prozessoptimierung für 3D-Schaltungsträger ermöglicht.

Die laserinduzierte Plasmaspektroskopie eignet sich im Allgemeinen gut für die Überwachung der chemischen Zusammensetzung von Badlösungen. Da die direkte Messung der Flüssigkeit noch nicht ausgereift ist, muss die Flüssigkeit zunächst in kleinen Mengen, beispielsweise in Tiegeln, getrocknet werden. Dieser Prozess lässt sich jedoch automatisieren, und in Kombination mit der LIBS-Technologie ist ein inline-fähiger Aufbau möglich. Dadurch wird eine kontinuierliche Überwachung der chemischen Zusammensetzung der Badlösungen ermöglicht, so dass im optimalen Konzentrationsbereich gearbeitet werden kann. So kann der praxisorientierte Anwender frühzeitig auf Abweichungen in der Badzusammensetzung sowie auf Kontaminationen reagieren.

9. Verwendung der Zuwendung

Durchführende Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1 (federführend):

Hahn-Schickard
Allmandring 9 b
70569 Stuttgart

Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. André Zimmermann
Dr. Karl-Peter Fritz

Forschungseinrichtung 2:

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
Wiener Straße 12
28359 Bremen

Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. Bernd Mayer

Personaleinsatz

Forschungseinrichtung 1:

Wissenschaftlich-technisches Personal: 24 Personenmonate
Technisches Fachpersonal: 12,48 Personenmonate

Forschungseinrichtung 2:

Wissenschaftlich-technisches Personal: 23,84 Personenmonate
Technisches Fachpersonal: 8,53 Personenmonate
Hilfskräfte: 660,32 Std.

Ausgaben für Geräte: /

Ausgaben für Leistungen Dritter: /

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der Forschungsziele notwendig und angemessen.

10. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Innovativer Beitrag

Die laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) bietet eine attraktive Lösung für die simultane Multielementanalyse von Metallkomponenten und Verunreinigungen in nasschemischen Vorbehandlungs- und Metallisierungsbädern. Diese Methode ermöglicht eine inline-Überwachung, die eine kontinuierliche Kontrolle der chemischen Zusammensetzung der Badlösungen sicherstellt. Im Vergleich zu traditionellen Techniken wie AAS oder ICP-OES bietet LIBS eine schnellere Qualitätsüberwachung.

Mit einer impedanzbasierten Messmethode kann die Badaktivität von außenstromlosen Kupferbädern bestimmt werden. Die schnelle und kontinuierliche Überwachung der Bäder ermöglicht eine zusätzliche Qualitätssicherung bei der Metallisierung von 3D-Schaltungsträgern und damit eine höhere Prozesssicherheit. Zudem kann das Ansprungsverhalten des Kupferelektrolyten auf verschiedenen laserdirektstrukturierten Substraten bestimmt werden, was eine substratspezifische Prozessoptimierung ermöglicht. Die Konzeption des Messsystems erfolgte unter dem Aspekt der späteren Einsetzbarkeit in einer Produktionsumgebung, was auch entsprechend demonstriert werden konnte.

Die im Projekt erarbeiteten komplementären Messmethoden eignen sich zum Aufzeigen eines Zusammenhangs zwischen der Badzusammensetzung und der Qualität der prozessierten Bauteile und sind somit ein weiterer Baustein bei der Qualitätssicherung von nasschemischen Vorbehandlungs- und Metallisierungsprozessen.

Voraussichtliche Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse

Durch das Projekt wurde die prinzipielle Anwendbarkeit der entwickelten und optimierten Systeme gezeigt. Eine spätere Geräteentwicklung wird durch Zusammenarbeit von Anwendern, Chemikalienherstellern und Geräteherstellern ermöglicht. Die hierfür benötigten Komponenten sind kommerziell verfügbar, dies verringert den Zeitaufwand einer Geräteentwicklung erheblich. Die im Projekt erzielten Erkenntnisse zu Prozessüberwachung und Analysetechnik können zur Entwicklung neuartiger Qualitätssicherungskonzepte und -Methoden verwendet werden. Diese Konzepte ermöglichen eine einfach zu handhabende und schnelle Inline-Qualitätskontrolle während des Produktionsprozesses in vielen Industriebereichen. Der wirtschaftliche und technologische Nutzen ist für viele Unternehmen in unterschiedlichsten Branchen relevant, vorrangig Hersteller von Mess- und Regeltechnik, sowie mit deren Integration beauftragte Anlagenbauer. Mittelbar profitieren sowohl Anwender als auch Hersteller von Badlösungen/Chemikalien auf dem Gebiet der Oberflächenvorbehandlungen für verschiedenste Aluminiumwerkstoffe sowie der Metallabscheidung in der Galvanotechnik und Schaltungsträgerfertigung. Weiterhin profitieren Sensor- und Messgerätehersteller aus dem Bereich der Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung. Zu den Anwendern zählen u. a. auch Halbzeuglieferanten, Lohnbeschichter, oder auch Zulieferer und Hersteller aus der Automobil- und Luftfahrtindustrie, Hersteller von Schaltungsträgern wie z.B. MID sowie von Komponenten mit galvanisch erzeugten Mikrostrukturen z.B. für LifeScience und Photonik. Sie können durch die Verfahren zur Qualitätssicherung die Zuverlässigkeit ihrer Beschichtungs- und Abscheideprozesse und somit ihrer Produkte deutlich verbessern.

11. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Projektergebnisse wurden laufend den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses mitgeteilt. Hierfür wurden während der Projektlaufzeit vier Sitzungen durchgeführt. Eine Auflistung aller während der Projektlaufzeit durchgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Projekttreffen mit PA	Fortschrittsbericht, Präsentation und Diskussion von Ergebnissen, Festlegung weiterer Maßnahmen, Diskussion über industrielle Umsetzung	Wechselnd zwischen beteiligten Instituten und PA-Mitgliedern	Kickoff-Treffen am 2.12.2022 28.06.2023 29.02.2024 18.09.2024
Teilnahme an Fachtagungen	Präsentation und Diskussion der neuesten Projektergebnisse mit breitem Fachpublikum, Informationsaustausch mit interessierten Unternehmen, insbesondere KMU	19. Norddeutscher Galvanotag, ZVO Oberflächentage, European Automotive Coating	05.2023, Hannover 09.2023, Berlin 09.2023, Neuhausen a.d.F.
Teilnahme an wissenschaftlichen Tagungen	Präsentation von Projektergebnissen vor wissenschaftlichem Publikum, Darstellung von Forschung in Anwendung, Diskussion neuer Verfahren	42. Ulmer Gespräch – Forum für Oberflächentechnik SurfaceTechnology GERMANY	05.2023, Ulm 06.2024, Stuttgart
Fortschrittsberichte als digitale Kommunikation durch Online-Veröffentlichung	Projektdarstellung und Verbreitung von Ergebnissen an interessierte Unternehmen über Online-Plattformen mit der Möglichkeit zur Diskussion	XING-Gruppen: „Kleben - aber sicher!“, „Kleben & Beschichten“, Webinare und Online-Veranstaltungen	Über gesamte Projektlaufzeit
Information über Internet	Vorstellung Projekt und Ergebnisse	Homepage & Newsletter Hahn-Schickard	Über gesamte Projektlaufzeit
Teilnahme an Ausstellungen	Präsentation von Projektergebnissen	Fachmesse electronica am Gemeinschaftsstand 3-D MID e.V. Industrieausstellung Internationaler Kongress MID Fachmesse Control	15.-18.11.2022 21.-22.6.2023 23.-26.4.2024
Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre	Ausbildung von Studenten verschiedener Studienrichtungen am IFM der Universität Stuttgart	Studentische Arbeiten	laufend

Zusätzlich sind die in Tabelle 2 aufgeführten Maßnahmen nach Projektende geplant, um die Projektergebnisse in die Wirtschaft zu transferieren.

Tabelle 2: Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Abschlussbericht	Zusammenstellung und ausführliche Diskussion aller Ergebnisse	Schriftliches Dokument	Projektende
Beratung und Unterstützung für KMU im Bereich Qualitätssicherung von OF-Beschichtungen	Beratung in Hinsicht auf die Möglichkeiten zur industriellen Umsetzung erreichter Erkenntnisse.	Beratung vor Ort beim Kunden, Beratung im IFAM, Durchführung gemeinsamer Projekte	Fortlaufend nach Projektende
Dissemination in einer Fachzeitschrift	Präsentation der Ergebnisse in anwendungsorientiertem Umfeld	z.B. PLUS, Galvanotechnik, Mikroproduktion	2025
Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften	Wissenschaftliche Publikationen der im Projekt gewonnenen Ergebnisse und Darstellung ihrer Anwendungen zum Wissenstransfer an das internationale Fachpublikum	z.B. „Journal für Oberflächentechnik“ (JOT), „Digital Manufacturing“, „QZ – Qualität und Zuverlässigkeit“, „International Surface Technology“ (IST)	2025
Teilnahme an Fachtagungen	Präsentation und Diskussion der neuesten Projektergebnisse mit breitem Fachpublikum, Informationsaustausch mit interessierten Unternehmen, insbesondere KMU	z.B. Internationaler Kongress MID	Zeitnah nach Projektende
Teilnahme an Ausstellungen	Präsentation von Projektergebnissen	Fachmesse electronica auf Gemeinschaftsstand mit Ensinger GmbH	12.-15.11.2024
Ergebnis- und Folgediskussionen über Online-Plattformen	Diskussion und weitere Verbreitung der Projektergebnisse, Planung von Folgeprojekte und Evaluierung neuer Fragestellungen speziell mit interessierten, nicht-PA Unternehmen. Einrichtung spezieller Interessensgruppen, z.B. bei XING möglich	z.B. Fortführung in XING-Gruppen: „Kleben - aber sicher!“, „Kleben & Beschichten“ Beitrag in LinkedIn	Fortlaufend nach Projektende
Einbeziehung der Forschungsergebnisse in die akademische Lehre / Lehrgänge an den beteiligten Forschungsstellen	Die Forschungserkenntnisse sollen in die Vorlesungsinhalte „Oberflächentechnik“ am IFAM sowie „Mikro- und Mikrosystemtechnik“ am IFM der Universität Stuttgart einfließen	Vorlesungen im Rahmen der Masterstudienausbildung am IFAM und IFM	Jährlich wiederholende, reguläre Seminare und Workshops in Masterstudiengängen
Planung von bilateralen Projekten	Einbeziehung der gewonnenen Projektergebnisse in zukünftige Industrie- und Forschungsprojekte.	Zusammenarbeit mit Mitgliedern des PA sowie weiteren interessierten KMUs	Planung schon zur Projektphase, fortlaufend nach Projektende

12. Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 22065 N der Forschungsvereinigung Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. wurde über die AiF / den DLR im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt.

Ein weiterer herzlicher Dank geht an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses für die Bereitstellung von Materialien, Analyse von Proben, sowie für die wertvollen Hinweise aus den zahlreichen Diskussionen.

Abschließend wollen wir noch allen Kolleginnen und Kollegen der Forschungseinrichtungen danken, die sowohl bei der Durchführung der Versuche als auch beim Projektmanagement involviert waren.