

Substitution umweltbelastender galvanischer Beschichtungsverfahren durch ressourceneffizientes laserunterstütztes Auftragschweißen zur Herstellung elektrischer Kontakte

(GreenCoating)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 34249/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU

von

Udo Beck	(Carl Dillenius Metallwaren GmbH & Co. KG)
Arno Marto	(Inovan GmbH & Co. KG Lunovu GmbH)
Andre Uhrlaß	(Harms & Wende QST GmbH)
Henning Janssen	(Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT)
Oliver Steffens	(Lunovu GmbH)

Aachen, Dezember 2020

Substitution umweltbelastender galvanischer Beschichtungsverfahren durch ressourceneffizientes laserunterstütztes Auftragschweißen zur Herstellung elektrischer Kontakte

(GreenCoating)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 34249/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU

von

Udo Beck	(Carl Dillenius Metallwaren GmbH & Co. KG)
Arno Marto	(Inovan GmbH & Co. KG Lunovu GmbH)
Andre Uhrlaß	(Harms & Wende QST GmbH)
Henning Janssen	(Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT)
Oliver Steffens	(Lunovu GmbH)

Aachen, Dezember 2020

1 Projektkennblatt

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	34249/01-21	Referat	21/2	Fördersumme	379.748€
Antragstitel		Substitution umweltbelastender galvanischer Beschichtungsverfahren durch ressourceneffizientes laserunterstütztes Auftragschweißen zur Herstellung elektrischer Kontakte			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
29 Monate	30.04.2018	30.09.2020	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.			Tel	0241/ 8904-261
	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT			Fax	0241/ 8904-6261
	Herr Henning Janssen			Projektleitung	
	Steinbachstr. 17 52074 Aachen			Dr.-Ing. Henning Janssen	
			Bearbeiter Tobias Schmid M.Sc.		
Kooperationspartner	Harms & Wende Qualitätssicherungstechnologie GmbH, Nordstraße 25, 09247 Chemnitz Lunovu GmbH, Kaiserstraße 100, 52134 Herzogenrath Carl Dillenius Metallwaren GmbH & Co. KG, Güllichstrasse 13, 75179 Pforzheim Inovan GmbH & Co. KG, Industriestr. 44, 75217 Birkenfeld				
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Elektrische Kontaktbauteile wie Steckverbinder, Schleiffedern oder Schnappscheiben werden an ihren Kontaktflächen mit Gold beschichtet, um die elektrische Leitfähigkeit der Bauteile zu verbessern. Die Beschichtung wird in galvanischen Verfahren unter Einsatz und Entstehung von umweltschädlichen chemischen Verbindungen und kontaminiertem Abwasser aufgetragen. Um diese Beschichtungsverfahren mit ihren umweltbelastenden Eigenschaften ersetzen zu können, wird im Forschungsvorhaben ein energie- und ressourceneffizientes Verfahren zum Auftragen von Edelmetallbeschichtungen entwickelt. Dafür wird der Beschichtungswerkstoff in Form dünner Mikrodrähte auf die Substratoberfläche gefördert und mittels Laserstrahlung aufgeschweißt. Zielsetzung ist die vollautomatisierte Beschichtung von Bauteilen in diesem umweltschonenden Verfahren zur Substitution galvanischer Beschichtungsprozesse.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Für die Umsetzung des Projektvorhabens wurde ein Konsortium bestehend aus Industrie- und Forschungspartnern zusammengestellt. In enger Zusammenarbeit werden in den ersten drei Monaten des Projektes die geplanten Eigenschaften des neuartigen Beschichtungsprozesses, der Bauteile sowie des Stand-Alone-Systems spezifiziert. Die Konsortialpartner entwickeln und fertigen im Anschluss daran die Einzelsysteme, zu denen die Fördersysteme der Edelmetalldrähte, die Systemtechnik der Laserbearbeitung sowie eine kamerabasierte Qualitätskontrolle gehören. Die Fertigstellung der Einzelsysteme erfolgt zum Ende des ersten Projektjahres und wird durch einen Meilenstein abgeschlossen. Auf Grundlage dieser Systeme wird die gesamte Anlage zusammengebaut, mit der die Prozessentwicklung durchgeführt wird, um einen reproduzierbaren Beschichtungsprozess zu erreichen. Die Inbetriebnahme stellt einen weiteren Meilenstein dar. Nach erfolgreicher Fertigung und Beschichtung der Demonstratorbauteile stehen die letzten Monate des Projektes für die Validierung der Ergebnisse und des Einsparpotenzials der neuartigen Beschichtungstechnologie zur Verfügung. Kriterien sind die benötigte Rohstoff- und Energiemenge sowie die Reduktion der verwendeten umweltschädlichen Stoffe. Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens durch das Konsortium bewertet.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Zu Beginn des Projekts wurden in Arbeitspaket 1 zunächst die Anforderungen an den Beschichtungsprozess erarbeitet und zwei unterschiedliche Versuchsbauteile definiert. Um die system- und prozessseitigen Parameter zu evaluieren, soll der Prozess zunächst an einem Schleifkontakt mit zwei Fingern entwickelt werden und anschließend auf ein zweites Demonstratorbauteil, eine Schnappscheibe, übertragen werden. Beide Bauteile decken einen möglichst breiten Querschnitt der elektrischen Verbindungstechnik ab und stellen außerdem verschiedene Anforderungen an die aufzubringende Goldschicht hinsichtlich Kontakt- und Durchgangswiderstand, Beschichtungsverschleiß sowie Korrosionsbeständigkeit. Basierend auf den definierten Bauteilen und Anforderungen erfolgt im zweiten Arbeitspaket die Konzeptentwicklung der Einzelkomponenten. Da entgegen der ursprünglichen Antragsidee durch den Austritt eines Partners kein Laserbender als Maschinengrundlage bereitgestellt werden konnte, wurden entsprechend das Blechhandlingsystem, der Drahtkopf inklusive Achssystem sowie die Laserstrahlableitfähigkeit durch das Fraunhofer IPT und die optische Qualitätssicherung von Harms & Wende für das Gesamtsystem entwickelt. Weiterhin wurden die Einzelkomponenten in Arbeitspaket 3 konstruktiv ausdetailliert. Carl Dillenius entwickelt ein modulares folgeverbundwerkzeug zur Fertigung der Schleifkontakte am Stanzband, wobei einzelne Werkzeugstufen zu oder abgeschaltet werden können. Hierdurch wird ein flexibler Fertigungsablauf möglich, sodass die Beschichtung beispielsweise vor oder nach dem Aufbiegen der Schleiffinger erfolgen kann. Parallel dazu konstruiert Fa. Inovan ein weiteres Demonstratorwerkzeug für die Schnappscheiben für den späteren Technologietransfer auf andere Bauteile. Außerdem passt Inovan Prüfstände zur Lebensdauerspezifikation der Schnappscheiben und Schleiffinger an und rüstet einen Reibverschleißprüfstand für die Schleifkontakte um. Harms & Wende QST entwickelt dabei ein QS-Modul mit zwei Kameras zur Bildverarbeitung. Während der Projektarbeiten konnte eine Prüfung von je zwei Bauteilen pro Auswertezyklus als Optimum nachgewiesen werden, wobei beide Kameras synchronisiert arbeiten. Der Gesamtprüfzyklus pro Kamera beläuft sich auf ca. 150 ms, sodass eine theoretische Prüfrate von bis zu 800 Teile pro Minute beim Einsatz beider Kameras möglich ist. Geprüft werden unter anderem die Position und Geometrie der Goldpunkte sowie die korrekte Punktzahl. Hinsichtlich der Beleuchtungssituation zeigt sich, dass blaues Licht den besten Kontrast zwischen dem Edelstahlsubstrat und den Goldpunkten erzeugt. Forschungsbedarf gab es allerdings noch hinsichtlich der Reflektionen und Schattenbildung auf den Kuppen-förmigen Bauteilen mit dem Goldpunkt. Lunovu entwickelt die Laserprozesssteuerung, wobei ein Laser mit Strahlableitfähigkeit als Grundlage verwendet wird. Hierin eingekoppelt befindet sich eine Kamera, mittels welcher die exakten Offsets per Bildverarbeitung erkannt und ausgewertet werden. Das Fraunhofer IPT übernimmt die Gesamtentwicklung des Systems und konstruiert einen pneumatischen Zangenvorschub und Führungen für das Blechhandling. Außerdem wurde ein innovativer 5-Achs-Drahtkopf entwickelt, sodass eine automatisierte Positionierung der Mikrogolddrähte relativ zum Bauteil und zum Scanner erfolgen kann. Dabei sind insbesondere präzise Führungen für den Mikrodraht entwickelt und eingebaut. Ein kompaktes Maschinengehäuse mit einer Nettostandfläche von 1 m² und einem Strahlenschutzkonzept für Laserschutzklasse 1 ermöglicht die direkte Integration des Stand-Alone-Systems in die Stanz-Biege-Prozesskette. Die Bedienung erfolgt mittels am Fraunhofer IPT entwickelter grafischer webbasierter Steuerung auf einer Beckhoff PLC.

Die Prozessparameter für das Mikroauftragschweißen des Golddrahts konnten zunächst auf ein Parameterfenster eingegrenzt werden, wobei sich Bestrahlungszeiten von 10 bis 20 ms ergeben. Die Goldpunkte lassen sich gezielt in ihrem Durchmesser und der Höhe einstellen und liegen für den Schleifkontakt im Bereich zwischen \varnothing 200 bis 280 μ m bzw. 75 bis 115 μ m Höhe. Mittels REM konnte ein Massenprozentanteil an der Goldpunktoberfläche von > 86 m% Au und in der Punktmitte von > 92 m% Au nachgewiesen werden. Neben der Einsparung umweltbelastender Galvaniknebenprodukte wird durch die GreenCoating-Technologie gegenüber selektiv flächig vorvergoldeten Stanzbändern eine hohe Ressourceneffizienz durch Einsparung von 62 bis 95 % des Golds erzielt (abhängig vom ursprünglichen Beschichtungsverfahren wie z. B. Brush und der Schichtdicke). Am Beispiel der Schleifkontakte lassen sich die Goldkosten von ursprünglich 1,21 bis 3,05 ct/Bauteil auf 0,46 ct/Bauteil reduzieren. Übertragen auf einen Use-Case von 5 Mio. Bauteilen lassen sich somit zwischen 37.600 € und 129.550 € einsparen. Dem gegenüber stehen die Systemkosten von ca. 180.000 €.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Pressemitteilung vom 20.9.2018: Neues, umweltschonendes Laserbeschichtungsverfahren senkt Herstellungskosten von elektrischen Kontakten

Geplant sind weitere Pressemitteilungen, Messeauftritte und Veröffentlichungen nach der Projektlaufzeit

Fazit

Die Systemtechnik zum Mikroaufschweißen von Golddrähten zur Beschichtung elektrischer Bauteile konnte erfolgreich automatisiert werden. Der Aufbau des Stand-Alone-Systems bietet die Möglichkeit zur unabhängigen Integration in die Prozessketten der Kontaktbauteilhersteller und löst die Abhängigkeit von Galvanikbetrieben auf. Zugleich lassen sich mittels des umweltschonenden und ressourceneffizienten Verfahrens signifikante Kostenvorteile durch Reduktion des Goldverbrauchs erzielen. Die Technologie wird nach der Projektlaufzeit zur Serienreife weiterentwickelt und für den kostengünstigen Einsatz in der Industrie optimiert.

2 Inhaltsverzeichnis

1	Projektkennblatt.....	3
2	Inhaltsverzeichnis	5
3	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	6
4	Zusammenfassung	8
5	Einleitung.....	9
6	Ergebnisdarstellung	13
6.1	AP1 – Spezifikation	13
6.2	AP2 – Konzeptentwicklung.....	16
6.2.1	Laseroptisches Konzept	16
6.2.2	5-Achs-Drahtkopf	17
6.2.3	Blechvorschub.....	18
6.2.4	Blechführung und Laserschutz	18
6.2.5	Optische Inspektion und QS-Modul	19
6.2.6	Konzeptentwicklung für die Prozesssteuerung	20
6.3	AP3 – Konstruktion und Fertigung der Teilsysteme	22
6.3.1	Modulare Stanzwerkzeuge	22
6.3.2	Fertigung der Demonstratorbauteile	23
6.3.3	Technischer Aufbau der realisierten optischen Inspektion	25
6.3.4	Entwicklung der Steuerung.....	27
6.3.5	Lasersprozesssteuerung.....	28
6.4	AP4 – Aufbau und Inbetriebnahme des Gesamtsystems.....	32
6.5	AP5 – Prozessentwicklung	33
6.6	AP6 – Demonstratorfertigung und Ergebnisvalidierung	37
6.6.1	Validierung des Beschichtungsprozesses	37
6.6.2	Zykluszeitbetrachtung	42
6.6.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	43
6.6.4	Verwertungsstrategie	45
7	Fazit	47
8	Literaturverzeichnis.....	48

3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Stoff- und Energieströme des laserunterstützten Beschichtens verglichen mit dem konventionellen, galvanischen Prozess	10
Abbildung 2: Prozessablauf beim Mikro-Laserauftragschweißen	11
Abbildung 3: Integration des Beschichtungsmoduls in die Fertigungslinie zum laserunterstützten Auftragen der Beschichtung	11
Abbildung 4: FEM-Berechnung zu Demonstratorbauteil (Fa. Inovan)	13
Abbildung 5: Demonstratorbauteil mit 2 Schleiffingern (Fa. Carl Dillenius)	13
Abbildung 7: Schnappscheibe am Trägerstreifen angebunden (Fa. Inovan)	14
Abbildung 8: Strahlablenkeinheit und Unterbau	16
Abbildung 9: Luer-Lock-Adapter mit Kanüle	17
Abbildung 10: Konzept des 5-Achs-Drahtkopfs	17
Abbildung 11: Blechvorschubskonzept	18
Abbildung 12: Konzept für die Blechführung	19
Abbildung 13: Steuerungs- und Schnittstellenkonzept	20
Abbildung 14: Kommunikationskonzept jedes Einzelschritts zwischen Gesamtsteuerung und Laserprozesssteuerung	20
Abbildung 15: Kommunikationskonzept QS-Modul	21
Abbildung 16: Streifenlayout (Carl Dillenius)	22
Abbildung 17: Modulares Stanzwerkzeug: Links: Werkzeug-Oberteil; Rechts: Werkzeug-Unterteil	23
Abbildung 18: Schnappscheiben-Werkzeug (CAD links, Real rechts)	23
Abbildung 19: Gestanzte Bauteile: Einzelteil links, Bauteile im Streifen rechts	24
Abbildung 20: Schnappscheiben Lebensdauerprüfstand	24
Abbildung 21: Hülle geschlossen	25
Abbildung 22: Hülle offen	25
Abbildung 23: Verbauter Kameratyp	25
Abbildung 24: Aufbau Beleuchtung	26
Abbildung 25: Schaltschrank komplett bestückt	27
Abbildung 26: Exemplarische Darstellung des Bedienoberfläche zum Einrichtbetrieb	28
Abbildung 27: Messung der Markierung unter dem Mikroskop	30
Abbildung 28: Kamerabild gefiltert mit Schwellenwert von 158	31
Abbildung 29: Bildverarbeitung wo Drahtspitze und Drahtoffset sind erkannt	31
Abbildung 30: Finaler mechanischer Aufbau	32
Abbildung 31: Ishikawa-Diagramm	33
Abbildung 32: Energieeintragsstudie und Spezifikation möglicher Fehlerbilder	34
Abbildung 33: Bauteile am Blechband: Schleiffinger beschichtet	34
Abbildung 34: Auswahl an Schliffbildern des beschichteten Schleiffingers	35
Abbildung 35: Ergebnisse der metallografischen Untersuchung per REM und EDX	36

Abbildung 36: Bauteile am Blechband: Schnappscheiben beschichtet	36
Abbildung 37: Reibverschleiß, Testaufbau	37
Abbildung 38: Prüfling, eingespannt	38
Abbildung 39: Links: Au beschichtete Feder auf Edelstahl. Rechts: Feder mit Goldpunkt auf Edelstahl	39
Abbildung 40: Links: Reibstelle an der Au-veredelten Feder. Rechts: Reibstelle Au-Punkt, nicht gut ausgerichtet.....	39
Abbildung 41: Blanke Feder auf CuZn.....	40
Abbildung 42: Feder mit Au auf Messing	40
Abbildung 43: Links: Reibstelle und Abrieb an Au auf CuZn. Rechts: Vergrößerung, Abrieb entfernt.....	41
Abbildung 44: Feder mit Goldpunkt auf CuZn.....	41
Abbildung 45: Au-Punkt. Links: 100.000 Zyklen. Mitte: 500.000 Zyklen mit Abrieb. Rechts: 500.000 Zyklen, gereinigt	42
Abbildung 46: Links: Die 2. Feder nach 60.000 Reibzyklen. Rechts: Die 2. Feder gereinigt .	42
Abbildung 47: Zykluszeitermittlung	43
Abbildung 48: Berechnung des Goldpunktvolumens und der Goldkosten.....	43
Abbildung 49: Bewertung der Ressourceneffizienz beider Demonstratorbauteile im GreenCoating-Verfahren. Links: Schleifkontakt. Rechts: Schnappscheibe.	44
Abbildung 50: Verwertungsstrategie in der Forschung.....	45
Tabelle 1: Vorgesehene Arbeitspakete im Forschungsvorhaben	12
Tabelle 2: Anforderungen an den Laserprozess von Lunovu	29

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts »GreenCoating« konnte zunächst ein Konzept für die automatisierte Beschichtung von elektrischen Kontakten mittels laserbasierten Mikroauftragschweißprozess von Golddrähten entwickelt werden. Der innovative GreenCoating-Prozess zielt auf eine Substitution bisheriger umweltschädlicher galvanischer Beschichtungsverfahren zugunsten eines ressourceneffizienten und umweltbewussten Prozesses ab. Zur Validierung wurden zunächst zwei Demonstratorbauteile, ein Schleifkontakt und eine Schnappscheibe, entwickelt. Ursprünglich sollte ein Laserbonder eines früheren Konsortialpartners als Basis für die Systemanpassung fungieren, jedoch stellte der Partner eine nicht ausreichende Eignung des Systems sowie fehlende Bearbeitungskapazitäten für die Befähigung dessen fest und schied aus dem Projekt aus. Als Ersatzpartner wurde Fa. Lunovu, Laserprozessspezialist, akquiriert. Die Systementwicklung übernahm das Fraunhofer IPT. Für das Handling von Blechstanzstreifen und Draht wurden entsprechende Einzelsysteme konzipiert und entwickelt. Des Weiteren forscht Harms & Wende QST an einer inline optischen Inspektion der goldbeschichteten Bauteile. Der Schweißprozess wird wie folgt realisiert. Ein Mikrogolddraht wird mit dem 5-Achs-Drahtkopf relativ zum am Stanzband befindlichen Kontaktbauteil positioniert. Eine On-Axis-Kamera in der Strahlableinheit detektiert die reale Drahtposition und verarbeitet diese. Entsprechend der Prozessparameter erfolgt der Schweißprozess, wobei ein Mikrogoldpunkt an der erforderlichen Stelle aufgeschweißt wird. Der Blechvorschub transportiert das Stanzband taktend weiter, wobei es dem nachgelagerten optischen Inspektionsschritt unterzogen wird. Dabei werden sowohl die Geometrie des Goldpunktes, die Position sowie die Gesamtanzahl vorhandener Punkte geprüft. Entgegen der angestrebten Beschichtungsrate von 600 Teile pro Minute konnten im Projektrahmen durch den Austritt des Partners lediglich 23 Teile je Minute beschichtet werden. Konzepte für die Optimierung der Zykluszeit bzw. Ansätze zur Reihenschaltung mehrerer Anlagen sind im Bericht aufgezeigt.

Mit der GreenCoating-Technologie konnten die Beschichtungseigenschaften validiert und die Ressourceneffizienz belegt werden. Demnach sind beim Bedarf des Edelmetalls Einsparpotenziale von 62 bis 95 % möglich. In Bezug auf einen Use Case von 5 Millionen gefertigten Schleifkontakten lassen sich bis zu 129.550 € an Gold einsparen. Beim selben Use Case mit 5 Mio Schnappscheiben entspricht dies einem Kostenvorteil von rund 1.154.150 €. Weitere Kosten, die für Logistikabläufe zwischen Stanzerei und Galvanik, für den Galvanikprozess selbst sowie für eingesetzte Chemikalien, die Entsorgung und Aufbereitung der chemischen Abfälle, Energiekosten und der Aufwand zum Schutz der Mitarbeiter und der Umwelt vor den Giftstoffen, wurden dabei nicht mitberücksichtigt. Ebenfalls außerhalb der Betrachtung liegen Faktoren wie die ständige Verfügbarkeit durch Prozessintegration und die Unabhängigkeit von Lieferantenpreisen (Galvanik) durch In-Haus Goldbeschichtung. Stanzabfälle, welche mit Gold beschichtet sind und aufwändig recycelt werden müssen, fallen ebenfalls nicht mehr an.

Ausblickend kann die Umweltrelevanz der Technologie als hoch bewertet werden. Durch den besonderen nachhaltigen und kostenoptimierten Prozessansatz sehen alle Partner in GreenCoating eine zukunftsreiche Technologie und entwickeln daher zunächst die jeweiligen Einzelsysteme weiter. Am Gesamtansatz forscht das Fraunhofer IPT ebenfalls und führt weitere Versuchsreihen durch. Optimierungspotenzial besteht jedoch noch hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Technologie um mit der Ausbringung galvanischer Prozesse konkurrenzfähig zu sein. Mittels Nachfolgeprojekten soll ein entsprechender Technologiereifegrad für eine Anwendung in der Serienfertigung erforscht werden.

5 Einleitung

Für die Elektronik-, Kommunikations- und Automobilindustrie wird jährlich eine Vielzahl elektrischer Bauteile mit Oberflächenbeschichtungen versehen. Allein in Deutschland wurden im Jahr 2014 Steckverbinder in einem Warenwert von mehr als 2 Mrd. € umgesetzt [1, S.7]. Steckverbinder werden wie auch Schleiffedern oder Schnappscheiben entlang ihrer Kontaktflächen in einem galvanischen Verfahren unter Einsatz und Entstehung umweltschädlicher Stoffe mit Gold beschichtet. Durch den niedrigen elektrischen Durchgangswiderstand des Edelmetalls kann bereits bei geringen wirkenden Normalkräften ein leitender Kontakt hergestellt werden. Die hervorragende Leitfähigkeit in Kombination mit dem inerten Verhalten des Goldes begründet seinen branchenübergreifenden Einsatz trotz der hohen Rohstoffkosten [2, S.4]. Im Betrieb der galvanischen Anlagen ergeben sich jedoch deutliche Nachteile. Neben der Entstehung umweltschädlicher Abwässer ist der hohe Energiebedarf der Anlagen und die Ineffizienz hinsichtlich des benötigten Edelmetallvolumens zu nennen.

In einer Bandgalvanik werden die Bauteile zur Beschichtung der Oberflächen durch ein Elektrolytbad gezogen. Eine extern angelegte Stromspannung erzeugt eine Ionenwanderung innerhalb der Flüssigkeit, in der sich das Gold auf dem Bauteil ablagert. Durch den Betrieb der hierfür benötigten Gleichrichter sowie der notwendigen Prozesstemperierung fällt in diesem Prozessschritt ein sehr hoher Energiebedarf an. In Galvanikbetrieben mit ca. 100 Mitarbeitern kann der Energieverbrauch bis zu 10.000 MWh/a betragen, wobei die Energiekosten bis zu 20 % der Gesamtkosten betragen [3, S.9-11]. Weiterhin wird eine deutlich größere Menge des Edelmetalls aufgetragen als zur vollständigen Funktionserfüllung notwendig wäre. Bedingt durch das Eintauchen werden auch Bauteilflächen beschichtet, die nicht am elektrischen Kontakt beteiligt sind.

In der Abwasserbehandlung der galvanischen Bäder müssen giftige Stoffe entsorgt werden, die durch den chemischen Prozess freigesetzt werden. Als Elektrolyt wird häufig Kaliumgoldcyanid eingesetzt. Es enthält freies Cyanid, dessen Konzentration sich durch das Abscheiden der Goldpartikel weiter erhöht [4, S.117f.]. Die giftigen Stoffe erfordern eine aufwändige Behandlung der Abwässer und stellen eine erhebliche Belastung für die Umwelt dar. Darüber hinaus ist die Abwasserbehandlung mit erhöhten Kosten für Galvanikbetriebe verbunden.

Als Modifikation der galvanischen Beschichtung konnte die sogenannte Selektivtechnik entwickelt werden. Durch gezieltes Abdecken nicht zu beschichtender Bauteilbereiche kann das aufgetragene Goldvolumen reduziert werden. Jedoch bietet auch die Selektivtechnik keine Verbesserung der ökologisch kritischen Rahmenbedingungen des grundsätzlichen Verfahrens und führt durch das Aufbringen erforderlicher Maskenwerkzeuge in der Vorbereitung zu einer erhöhten Prozesskomplexität. Weder die benötigte Energie noch die Menge des schädlichen Cyanids können durch die Selektivtechnik reduziert werden. Eine Integration in eine durchgehende Fertigungskette mit Stanz-Biege-Automaten ist auch mit dieser Weiterentwicklung nicht möglich.

Unter dem Projektnamen »Mifulas 2« wurde am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT der Ansatz erforscht, Edelmetalle für Beschichtungsprozesse in Pulverform aufzuschweißen. Jedoch wurde festgestellt, dass die Förderung in Pulverform große Schwierigkeiten bereitet, da das Verfahren einen schlechten Wirkungsgrad aufweist und gravierende Prozessinstabilitäten auftreten [5, S.103-113].

Im Forschungsprojekt »GreenCoating« soll die galvanische Behandlung der elektrischen Verbindungselemente als Beschichtungsverfahren für geeignete Bauteile ersetzt werden. Durch ein laserbasiertes Auftragschweißen von kleinen Goldpunkten im Kontaktbereich kann die überlegene Leitfähigkeit der Bauteile beibehalten werden, ohne die umweltbelastenden Auswirkungen der galvanischen Beschichtung in Kauf nehmen zu müssen. Das Gold wird dazu in Form dünner Drähte auf die zu beschichtenden Bereiche der Bauteiloberfläche gefördert. Durch die eingebrachte Laserenergie schmelzen die Drahtspitzen auf und verbinden sich stoffschlüssig mit dem Substrat. Neben dem deutlich geringeren Energiebedarf ist nach bisherigen Machbarkeitsversuchen eine Reduktion der notwendigen Goldmenge um bis zu 84 % möglich. Die umweltschädlichen Stoffe und bisher notwendigen Abwasserbehandlungen der galvanischen Bäder können vollständig eingespart werden. Ein Vergleich der Energie- und Stoffströme zwischen konventionellen galvanischen Beschichtungsverfahren und dem laserunterstützten Beschichten ist in Abbildung 1 zu sehen.

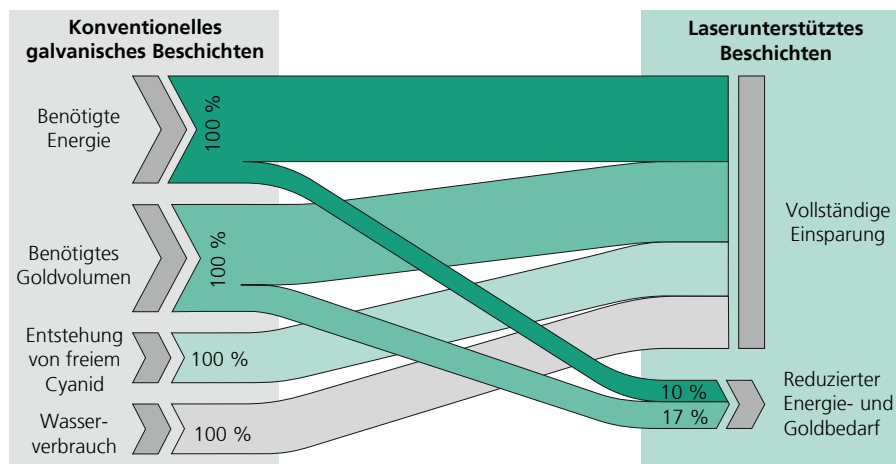


Abbildung 1: Entwicklung der Stoff- und Energieströme des laserunterstützten Beschichtens verglichen mit dem konventionellen, galvanischen Prozess

Ziel der vorliegenden Projektidee ist das Ersetzen des galvanischen Beschichtungsverfahrens für elektrische Kontakte. Zur Vermeidung der schädlichen Stoffe, die im Betrieb einer galvanischen Anlage anfallen, soll das Verfahren des Mikro-Laserauftragschweißens für reduzierten Energie- und Materialbedarf automatisiert und in eine Prozesslinie integriert werden. Dazu wird ein Einzelsystem konzipiert und entwickelt, in welchem dieser ressourceneffiziente Beschichtungsprozess vollautomatisiert ohne manuellen Zwischenschritt durchgeführt wird. Dieses Beschichtungsmodul wird, wie in Abbildung 3 dargestellt, in eine Stanz-Biege-Prozesslinie zur Herstellung der elektrischen Kontakte integriert.

Beim Mikro-Laserauftragschweißen wird das Edelmetall, mit welchem das Substrat beschichtet werden soll, in Form von abgewickelten Mikrodrähten auf die Beschichtungsstelle geführt. Der Durchmesser dieser Mikrodrähte liegt im Bereich zwischen 50 und 100 µm. Die Drahtspitze wird durch den Einsatz von Laserstrahlung vom Draht abgeschmolzen und verbindet sich stoffschlüssig mit dem Substratwerkstoff, vgl. Abbildung 2. Das Bauteil wird anstelle einer flächigen Beschichtung mit einzelnen Goldpunkten versehen, die den Strom durch die Kontaktstelle leiten. Der Prozess läuft unter geringem Energieaufwand und ohne die Entstehung oder den Verbrauch von umweltschädlichen Stoffen ab.

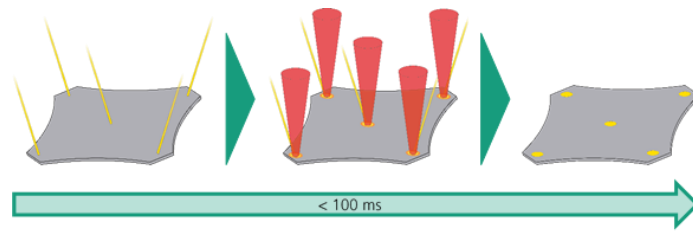


Abbildung 2: Prozessablauf beim Mikro-Laserauftragschweißen

Für die Substitution der chemischen Beschichtung ist zwingend erforderlich, dass sich dieses innovative Verfahren in der industriellen Fertigung durchsetzt. Notwendige Voraussetzung dafür ist die Automatisierung der einzelnen Prozessschritte unter Einbehaltung der kurzen Bearbeitungszeitdauer pro Bauteil, die in der Galvanik vorliegt. Dazu wurde die Beschichtung von 600 Bauteilen pro Minute als Zielgröße für dieses Projekt angesetzt. Demnach muss der gesamte Prozess für ein Bauteil in einer Zeit von nur 100 ms durchgeführt werden. Dazu gehört der Vorschub des Bleches, aus dem die Bauteile herausgestanzt werden, sowie die Drahtzufuhr von einem Draht an verschiedenen Positionen nacheinander. In dem knappen Zeitfenster muss außerdem die Positionsabweichung der Drahtspitze aufgenommen und der Offset an den Laserscanner zum Ablenken der Laserstrahlung weitergeleitet werden. Der Drahtkopf und Laserstrahl fahren nacheinander die zu beschichtenden Punkte an und erzeugen somit die Beschichtungspunkte. Obwohl die Machbarkeit des Verfahrens gezeigt werden konnte, war eine Neuentwicklung des Drahtfördersystems notwendig, um den Draht zuverlässig in den Bereich der Zielposition zu führen. Für das Blechband waren Führungen für den Vorschub durch das Beschichtungsmodul zu entwickeln. Zur nachgelagerten Qualitätsüberwachung werden die aufgetragenen Goldpunkte in ihrer Anzahl und Position kamerabasiert überprüft. Somit wurden die Voraussetzungen geschaffen, um den hohen Energiebedarf für die Beschichtung der Teile zu senken und die umweltschädlichen Stoffe, die aktuell dafür anfallen, zu reduzieren. Neben einer deutlichen Entlastung der Umwelt werden Kosten in der Bearbeitung der Bauteile eingespart, wodurch diese zu günstigeren Preisen am Markt angeboten werden können.

Die unterschiedlichen Prozessschritte des Laser-Mikroauftragschweißens werden in einem eigenständigen Beschichtungsmodul umgesetzt. Zur Herstellung elektrischer Kontaktbauteile werden diese in einem Stanz-Biegeprozess aus einem durchlaufenden Blechband herausgestanzt. Im Rahmen des Projektes soll dieses Beschichtungsmodul wie in Abbildung 3 gezeigt direkt in den Stanz-Biege-Prozess integriert und mit den Pressen synchronisiert werden. Auf diese Weise erhalten Hersteller das fertig gestanzte und beschichtete Bauteil unmittelbar nach dem Stanz-Biege-Beschichtungsprozess. Damit wird neben Material- und Energieeinsparungen der logistische Aufwand für die produzierenden Unternehmen gesenkt, was durch das Ersetzen von Transportschritten einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und die Umwelt hat.

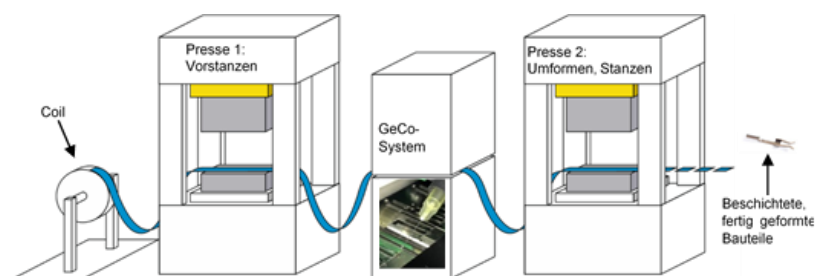


Abbildung 3: Integration des Beschichtungsmoduls in die Fertigungslinie zum laserunterstützten Auftragen der Beschichtung

Zu Beginn des Projektes sind im Konsortium in Arbeitspaket 1 die Anforderungen an den Prozess, das System und das Demonstratorbauteil abzuleiten (vgl. Tabelle 1). Die Spezifikation umfasst die Erstellung eines Lasten- und Pflichtenhefts. In Arbeitspaket 2 werden im Anschluss Konzepte zu den verschiedenen Teilsystemen ausgearbeitet. Dazu zählt ein Konzept für die Förderung und Positionsüberwachung der Mikrodrähte, die Führung des Drahtbands sowie ein Konzept der integrierten kamerabasierten Qualitätsüberwachung der auftraggeschweißten Punkte. Eine Prozessregelung muss entworfen werden, welche die Einzelprozesse des Verfahrens verbindet und synchronisiert. Daraufhin werden die Systeme in Arbeitspaket 3 konstruiert und gefertigt, sodass in Arbeitspaket 4 ein Stand-Alone-System aufgebaut und in Betrieb genommen werden kann. Zu Beginn von Arbeitspaket 5 werden an Testbauteilen, für die ein eigenes Werkzeug für den Stanz-Biegeprozess entwickelt wird, die optimalen Prozessparameter für den Beschichtungsprozess entwickelt. Sobald das Verfahren verlässlich und reproduzierbar für die Testbauteile angewendet werden kann, wird der Prozess für das Demonstratorbauteil des Endanwenders Inovon GmbH & Co. KG entwickelt. Das finale Arbeitspaket enthält die Auswertung der erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Eigenschaften der Kontaktstelle und der erreichten Prozessparameter. Eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und der benötigten Energie- und Rohstoffmenge zur Steigerung der Ressourceneffizienz gegenüber der galvanischen Beschichtung werden zur Bewertung der Technologie herangezogen.

Tabelle 1: Vorgesehene Arbeitspakete im Forschungsvorhaben

Arbeits- und Zeitplan »GreenCoating«																						
Arbeitspakete		Projektjahr 1											Projektjahr 2									
1	Spezifikation	■	■	■																		
2	Konzeptentwicklung	■	■	■	■	■																
3	Entwicklung, Konstruktion und Fertigung der Teilsysteme												■	■	■	■	■					
4	Aufbau und Inbetriebnahme des Gesamtsystems																					
5	Prozessentwicklung																					
6	Demonstratorfertigung und Validierung der Ergebnisse																					

Das Verfahren des Mikro-Laserauftragschweißens lässt sich auf eine Vielzahl unterschiedlicher Bauteile anwenden. Es eignet sich besonders für Produkte, deren Kontaktflächen zur Weiterleitung des elektrischen Stroms geringe Ausmaße aufweisen. Hier kann die Beschichtung mit einer geringen Anzahl an Goldpunkten aufgetragen werden und kurze Zykluszeiten sind für die Beschichtung möglich.

Aus diesen Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich als erste Zielgruppe diejenigen Unternehmen, die elektrische Kontaktbauteile herstellen und beschichten. Dazu zählt beispielsweise der Endanwender im Projekt, die Inovon GmbH & Co. KG. Im Rahmen des Projektes soll das Beschichtungsverfahren beispielhaft für Demonstratorbauteile des Endanwenders umgesetzt und die Integrationsfähigkeit in den Produktionsprozess sichergestellt werden. Die Demonstratorbauteile orientieren sich an Schnappscheiben oder Schleiffedern aus dem Produktangebot des Unternehmens.

Durch Anwendung der Technologie kann somit die Marktposition der produzierenden Unternehmen für Kontaktbauteile gestärkt werden. Darüber hinaus stellt die Technologie für alle Firmen, die im Bereich der Lohnbeschichtung arbeiten, eine Alternative zur galvanischen Beschichtung dar. Sie können ihren Kunden diese Technologie bei Eignung der Bauteile für das laserunterstützte Beschichten anbieten. Dabei profitiert der Lohnbeschichter von einem geringeren Energiebedarf und der Reduktion von Abwasser, welches Nachbehandlungen benötigt.

6 Ergebnisdarstellung

6.1 AP1 – Spezifikation

In Arbeitspaket 1 wurden zunächst die Aufgaben für die Projektlaufzeit festgelegt und in Zusammenarbeit des gesamten Konsortiums die prozesseitigen und systemseitigen Anforderungen an den innovativen Beschichtungsprozess abgeleitet und Validierungskenngrößen definiert. Unter der Leitung von Carl Dillenius und Inovan wurde das Design des ersten Demonstratorbauteils in Form eines Schleiffingers mit einer Kuppe stellvertretend für ein typisches Produkt für Anwendungen in der elektrischen Verbindungstechnik definiert. Als Grundmaterial kommt ein austenitisches Edelstahl-Stanzband aus 1.4310 (X10CrNi18-8) mit einer Bandbreite von 40 mm und einer Blechdicke von 0,1 mm zum Einsatz. Die Grundfläche des Demonstratorbauteils wird auf 40 x 20 mm² festgelegt. Um den Beschichtungsprozess möglichst nahe an gängigen Kontaktelementen anzulehnen und die Beschichtungsaufgabe komplexer zu gestalten, besitzt der Demonstrator zwei Schleiffinger mit zu vergoldender geprägter Kuppe (Abbildung 5). Die von Inovan durchgeführte FEM-Berechnung zu diesem Design ergab, dass bei einer Kraft von 0,1 N auf die Kuppe des Schleiffingers (pro Schleiffinger) dieser sich um 2 mm in der Y-Achse verformt (Abbildung 4)

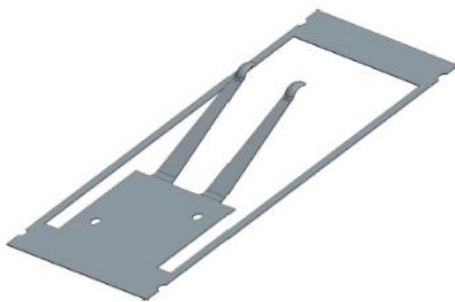


Abbildung 5: Demonstratorbauteil mit 2 Schleiffingern (Fa. Carl Dillenius)

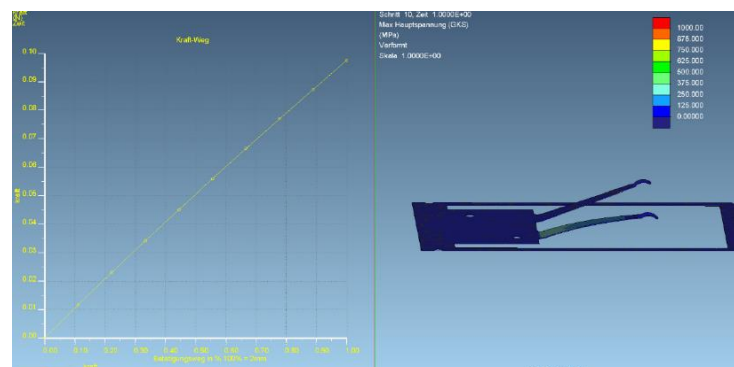


Abbildung 4: FEM-Berechnung zu Demonstratorbauteil (Fa. Inovan)

Als Arbeitsziel von Carl Dillenius als auf die Fertigung von Stanzteilen in kleinen und mittleren Serien spezialisiertes KMU wurde weiterhin die Entwicklung und Herstellung eines modularen Stanzwerkzeuges und die Fertigung der Schleifkontakt-Teile als praxisnahes Demonstratorbauteile festgelegt. Diese sollten sowohl als Einzelteile als auch „endlos“ am Streifen auf einer Spule aufgewickelt herstellbar sein.

Zur Validierung der Übertragbarkeit des Prozesses auf andere Bauteilgeometrien wurde des Weiteren von Inovan ein zweites Demonstratorbauteil entworfen (Abbildung 6). Es handelt sich dabei um eine konkav geformte Schnappscheibe, die mit insgesamt fünf Goldpunkten beschichtet werden soll. Die Kalotte der Schnappscheibe soll auf der Innenseite mit vier Punkten je an einer der Ecken und mit einem zentralen mittigen Punkt beschichtet werden. Außerdem wurde als Aufgabe für Inovan die Entwicklung und Herstellung eines Werkzeugs zur Herstellung der Schnappscheiben und die Erstellung eines Lebensdauertestes der Demonstratorbauteile und eines Reibverschleißprüfstandes zur Validierung der Ergebnisse definiert.

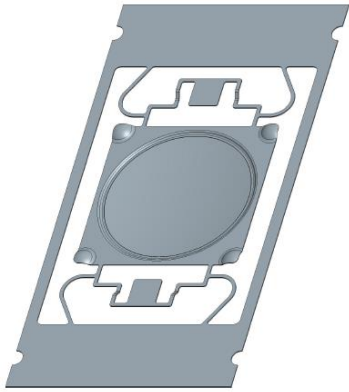


Abbildung 6: Schnappscheibe am Trägerstreifen angebunden (Fa. Inovan)

Um die hergestellten Bauteile direkt im Beschichtungsmodul einer Qualitätskontrolle unterziehen zu können, wurde für den Projektpartner Harms & Wende QST die Entwicklung und Konzeption eines kamerabasierten Qualitätssicherungsmoduls als Aufgabe festgelegt. Dazu soll ein Kamerasystem samt Beleuchtung und weiterer für die Inspektion notwendiger Komponenten zusammengestellt werden. Zusätzlich soll die Software zur Überprüfung der Anzahl und Position der Goldpunkte, Überwachung von definierten Lagetoleranzen und Überprüfung der Durchmesser der aufgeschweißten Goldpunkte entwickelt werden. Der Prüfparameterumfang wird zunächst auf die Anzahl der vorhandenen Goldpunkte, deren Durchmesser sowie deren Position festgelegt. Anhand dieser Validierungskenngrößen werden die Bauteile nach dem Status „i. O.“ oder „n. i. O.“ definiert. Da die Vorschubgeschwindigkeit bei maximal 600 Bauteilen/Minute liegt, ist damit der Rahmen für die maximale Verarbeitungszeit der optischen Inspektion, sprich PC Technik mit Inspektionsalgorithmen und Kameratechnik, vorgegeben. Das hier durch die Harms & Wende QST GmbH entwickelte System zur optischen Überwachung soll innerhalb des Beschichtungsmoduls platziert werden. Dabei soll dieses System als „Stand Alone“ innerhalb der Anlage arbeiten, jedoch mit der gesamten Technologie prozesstechnisch verknüpft werden. Die zu überprüfenden Goldpunkte befinden sich auf der Blechoberseite, sodass die Inspektion von oben stattfindet. Die bautechnische Größe der optischen Zelle sollte im Laufe der gemeinsamen Projektarbeit festgelegt werden.

Der anfänglich beteiligte Partner F&K Delvotec Bondtechnik GmbH sollte im Rahmen des Forschungsprojekts ein Laserbonder als Basis bereitstellen, wobei entsprechende Anpassungen an Drahthandling, Laser- und Optikkonzept sowie dem Blechhandling vorgenommen werden sollten. Delvotec schied auf eigenen Wunsch jedoch innerhalb der Spezifikationsphase aus dem Konsortium aus. Die Arbeitsinhalte wurden dementsprechend auf das Fraunhofer IPT und einen neu akquirierten Partner, Fa. Lunovu GmbH, übertragen.

Das Fraunhofer IPT übernimmt daher auf der systemtechnischen Seite die Neuentwicklung des Prüfstandes, Koordination mit den Projektpartnern, Integration der Hard- und Softwarekomponenten in den Prüfstand sowie die Durchführung der Versuchsreihen am Prüfstand und Auswertung der Versuchsergebnisse. Dafür wurden als Ziele für den Umbau des Prüfstandes ein neuer Drahtkopf mit Achssystem, ein integrierter Blechvorschub mit Blechführung definiert. Insbesondere bei Bearbeitung von Endlos-Stanzband sind entsprechende Vorkehrungen für die Durchschleusung des Blechs in und aus dem Stand-Alone-System zur Einhaltung der Laserschutzvorgaben vorzusehen. Auf der prozesstechnischen Seite entwickelt das Fraunhofer IPT den Mikroauftragsschweißprozess und grenzt durch intensive Studien die Parameterräume auf ein Optimum ein. Ebenfalls erfolgt

eine Festlegung des Beschichtungswerkstoffs. Eingesetzt werden Mikrogolddrähte mit einem Rechteckquerschnitt von $20 \times 100 \mu\text{m}^2$ und mit einer Reinheitsgruppe 4N (99,99% Au). Flachdrähte ermöglichen im Vergleich zu Runddrähten eine reduzierte gerichtete Reflektion durch die Oberflächenkrümmung eines Runddrahts und lassen sich daher besser Laserschweißen.

Lunovu als neuer Partner tritt als Laserprozessspezialist ein und arbeitet an der vollautomatischen Steuerung des Lasers, des Scanners und der eingekoppelten Kamera zur Erkennung des Golddrahtes. Die Software soll auch die Möglichkeit zur Ermittlung des Offsets zwischen Draht und Bauteil enthalten und möglichen Prozessfehler erkennen wie z. B. das Festschweißen des Drahts am Substrat. Entsprechende Soft- und Hardwareschnittstellen für Laser und Scanner sowie die On-Axis-Kamera wurden definiert.

Anhand der Aufgabendefinition und der entworfenen Demonstratorbauteile konnten anschließend die prozess- und systemtechnischen Anforderungen in einem Lasten- und Pflichtenheft gebündelt werden.

6.2 AP2 – Konzeptentwicklung

Im zweiten Arbeitspaket wurden die Einzelbaugruppen für die Integration in den Prüfstand entwickelt. Durch den Austritt eines Partners kann nicht wie geplant eine Anpassung eines bestehenden Laserbonders durchgeführt werden. Der Entwicklungsumfang in AP2 dehnt sich daher auf die Komponenten des Drahtkopfs inklusive Achssystem, den Blechvorschub und die Blechführung, sowie die laseroptischen Komponenten und die optische Bauteilinspektion aus. Übergeordnet wird ein Prozesssteuerungskonzept entwickelt. Das Konzept des Prozessablaufs sieht die Positionierung des Stanzbands auf einer einheitlichen Blechlafebene vor, wobei analog zur Bearbeitung in einem Presswerkzeug getaktet vorgeschoben wird. Dies bietet unter anderem auch die Möglichkeit, den Mikroauftragschweißprozess sowie die optische Inspektion am ruhenden Bauteil durchzuführen. Entsprechend ist der Draht an die jeweilige Schweißposition zu führen. Eine Ermittlung zwischen auf Soll-Position positioniertem Draht (-kopf) und der durch realen Ist-Position des biegeschlaffen Drahts soll mittels Bilderkennung über eine On-Axis-Kamera erfolgen. Nachfolgend wird näher auf die Einzelbaugruppen und deren Konzepte eingegangen.

6.2.1 Laseroptisches Konzept

Das Forschungsprojekt baut durch den Wegfall eines Partners nun auf einem zuvor entwickelten Prüfstand auf und umfasst eine Strahlablenkeinheit zur Positionierung des Laserspots im Bearbeitungsfeld, eine On-Axis-Kamera zur Prozessbeobachtung sowie einen Faser-Laser mit 250 Watt.

Der 3D-Laserscanner wird durch einen höhenverstellbaren Unterbau ergänzt (siehe Abbildung 7). Gemäß der Anforderungs- und Demonstratorbauteildefinition besteht die Möglichkeit, die Schleiffinger im flachen, geprägten Zustand, als auch im aufgebogenen, geprägten Zustand zu beschichten. Entsprechend kann der Fokuspunkt des Laserstrahls an eine sich ändernde Bauteilhöhe angepasst werden. Innerhalb der Konzeptphase erweist sich ein höhenverstellbarer Scannerunterbau als optimal, da alle weiteren Komponenten des Prüfstandes auf die Blechführungsebene ausgerichtet werden können. Parallel dazu beinhaltet der Scanner eine individuelle Einkopplung einer Kamera, wobei diese als On-Axis-Prozessbeobachtung ausgeführt ist. Hierdurch wird es ermöglicht, spätere Offsets zu erkennen und zu verarbeiten. Zusätzlich wurde unter dem Laserscanner eine Ringbeleuchtung integriert, um so das Bauteil an der Laserbearbeitungsstelle optimal für den Automatisierungsprozess über das In-Line-Kamerasystem beleuchten zu können.

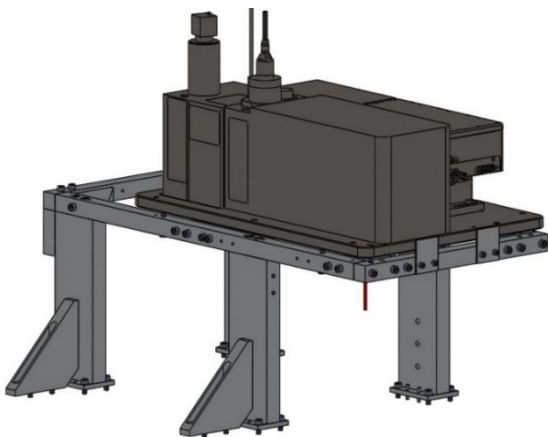


Abbildung 7: Strahlablenkeinheit und Unterbau

6.2.2 5-Achs-Drahtkopf

Für ein präzises Drahthandling wurde im Projekt ein Drahtkopf entwickelt, welcher auf kurze Zykluszeiten sowie einfache Handhabung und schnelle Rüstzeit optimiert ist. Entsprechend des Gesamtprozesskonzepts soll der Draht relativ zum beschichtenden Stanzband positioniert werden. Hierfür wird ein dynamisches 3-Achssystem bestehend aus zwei Linearmotorachsen für X und Y sowie einer servomotorischen Spindelachse für Z ausgelegt, siehe Abbildung 9. Die Wiederholgenauigkeit entspricht jeweils $\pm 0,005$ mm und genügt den Anforderungen an die Positionsgenauigkeit der aufzuschweißenden Punkte, die mit $\pm 0,1$ beziffert wird.

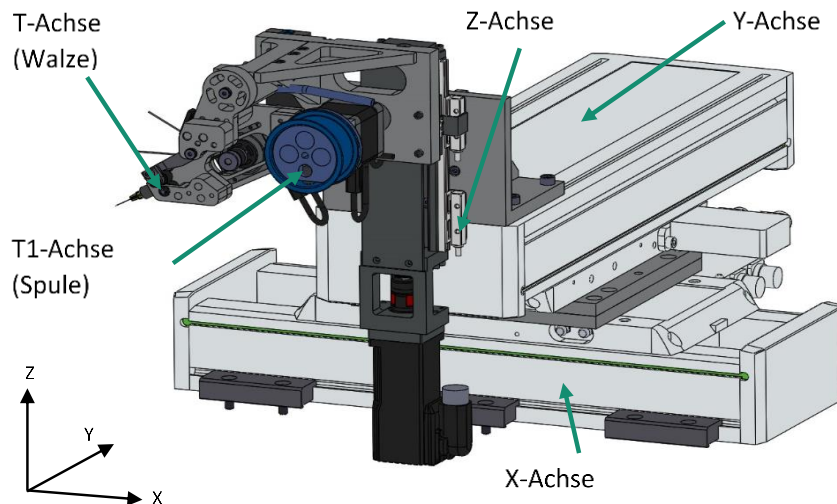


Abbildung 9: Konzept des 5-Achs-Drahtkopfs



Abbildung 8: Luer-Lock-Adapter mit Kanüle

Um einen möglichst einfachen Drahtwechsel zu ermöglichen, wurde der Drahtkopf so gestaltet, dass eine direkte Zugänglichkeit der Drahtspule gegeben ist und ein simples Einfädeln ermöglicht wird. Zur sicheren Fixierung der Spule wurden Federelemente in den Drahtspulenhalter integriert, die die Drahtspule auf den Halter klemmen. Außerdem wird der Drahtspulenhalter mittels eines Motors angetrieben (T1-Achse), sodass der Golddraht kontinuierlich abgewickelt werden kann, während der Drahtvorschub im Schweißtakt erfolgt. Die Vorschubbewegung des Golddrahts wurde mittels eines Walzenvorschubs konzipiert, dessen obere Walze sich mittels einer Schwinde bewegen lässt (T-Achse). Der Walzenvorschub hat außerdem den Vorteil, dass der rechteckige und flache Golddraht zwischen den Rollen ausgerichtet wird. Zur Drahtführung werden präzise Kanülen aus dem Medizinbedarf verwendet, welche über einen genormten Luer-Lock-Anschluss verfügen und mittels Adapter angebunden werden. Gleichzeitig wurde in den Adapter ein Anschluss für Druckluft bzw. Prozessgas integriert, um so die Reibung innerhalb der Kanüle zu reduzieren und zur Prozessstabilitätssteigerung eine Schutzgasatmosphäre zu erzeugen. Aufgrund der geometrischen Komplexität wurde der Luer-Lock-Adapter für den 3D-Druck mittels SLA-Technologie optimiert, welche den Vorteil einer sehr hohen Präzision, guter Oberflächengüte im Vergleich zu anderen verbreiteten 3D-Druck Verfahren und eine sichere Herstellung auch sehr komplexer Bauteilgeometrien bietet (Abbildung 8). Um den Winkel der Kanüle zum Bauteil einstellen zu können, wurde die Montagegestelle am Übergang zwischen Drahtkopf und restlichem Achssystem rotatorisch verstellbar gestaltet. Außerdem lässt sich so für den Fall einer Wartung des Montagekopfes dieser mit wenigen Handgriffen vom restlichen System trennen und dem Prüfstand entnehmen.

6.2.3 Blechvorschub

Das Blechhandling und die Vorschubbewegung werden als vollautomatischer pneumatischer Zangenvorschub konzipiert. Mittels diesem ist es möglich, das Blech innerhalb von 150 ms vorzuschieben. Der Blechvorschub besteht im Wesentlichen aus drei Pneumatikzylindern, einem verstellbaren Blechführungssystem, einem Unterbau, einem einstellbaren Anschlag sowie steuerungstechnische Peripherie wie Ventile und Endlagensensoren. Um von der Bauteilgröße unabhängig bzw. flexibel zu sein, wurde die Hublänge des Hauptvorschubzylinders auf eine maximale Vorschublänge von 60 mm konzipiert. Auf dem Schlitten des Vorschubzylinders ist der dynamische Klemmzylinder montiert, der wiederum mittels eines rotationssymmetrischen Niederhalters das Blech festhält, vgl. Abbildung 10.

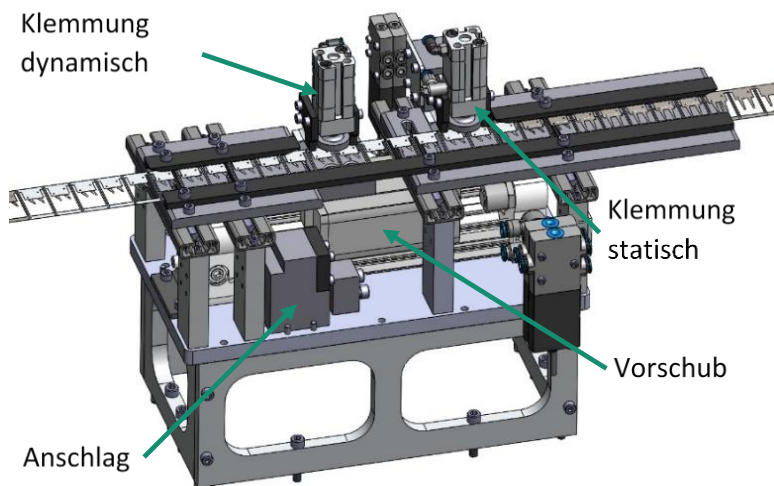


Abbildung 10: Blechvorschubskonzept

Um eine exakte Positionierung des Blechstreifens zu gewährleisten wurde der Niederhalter mit einem Sucherstift an der Unterseite versehen, welche in die Sucherlöcher der Blechstreifen greifen. Der zweite Zangenzylinder klemmt das Blech statisch, während der dynamische Klemmzylinder zurückfährt. Die Vorschublänge wird durch einen Anschlag begrenzt und kann über eine Feingewindeschraube präzise eingestellt werden.

6.2.4 Blechführung und Laserschutz

Eine durchgängige Blechführung wurde zwischen den einzelnen bereits beschriebenen Modulen verbaut, damit das dünne Blechband sich nicht durch verbiegen verschieben kann. Dafür wurden reibungsminimierende Materialien verwendet, die auf stabilen Unterbauten verschraubt sind. Über Nuten lassen sich die Führungen flexibel auf eventuelle Blechbreitenänderungen verstellen.

Da der Blechstreifen von einer Spule außerhalb des Prüfstandes abgewickelt wird und auch außerhalb des Prüfstandes aufgewickelt wird, musste ein Durchbruch in die bisherige Wandung erfolgen. Da dadurch der Prüfstand aber nicht mehr den Vorgaben des Laserschutzes entsprach, mussten für die Durchbrüche ein den Laserschutzvorgaben entsprechender Schutz konzipiert werden. Auch in den Laserschutzgehäusen, die außen am Prüfstand angebracht sind, befinden sich die Blechführungen, die nach dem gleichen Prinzip wie im inneren des Prüfstandes aufgebaut sind. Durch die Laserschutzkanäle und einigen weiteren montierten Blechen und Dichtungen kann der Austritt der schädigenden

Laserstrahlung verhindert werden, wodurch die Laserschutzklasse 1 wie in AP1 definiert erlangt wurde (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 11: Konzept für die Blechführung

6.2.5 Optische Inspektion und QS-Modul

Durch das QS-Modul des Projektpartners Harms & Wende soll eine integrierte Qualitätssicherung ermöglicht werden. Durch die in der ersten Projektphase mit den Projektpartnern ausdetaillierte Zielstellung ergaben sich für die Harms & Wende QST GmbH die schon unter AP 1 aufgeführten Anforderungen an die optische Inspektion, unter anderem auch die Anforderungen an die Taktzeit und die Art des Bauteils. Nach bisherigem Erfahrungsstand können ohne eine solche nachgelagerte Inspektion die qualitativen Anforderungen des Gesamtbeschichtungsprozesses nicht sicher gewährleistet werden. Somit ist die entwickelte optische Inspektion eine Voraussetzung für den Erfolg des Gesamtprozesses.

Auf dieser Basis wurde ein Überwachungskonzept erarbeitet, welches die verschiedenen Anforderungskriterien erfüllen kann. Durch den Aufbau einer Testvorrichtung konnten noch vor der Realisierung des Gesamtaufbaus Versuche in Bezug auf die Realisierung der kurzen Inspektionszeiten und in Bezug auf die Inspektion von ersten Musterteilen durchgeführt werden. Aus den Versuchen heraus entstand dann das Überwachungskonzept, welches zu einem System mit zwei Kameras führte, die wechselweise die Inspektion vornehmen.

Eine besondere Herausforderung stellten die geringe Taktzeit sowie die zu inspizierenden Materialien wegen ihres Reflexionsverhaltens dar. Dazu wurden umfangreiche Tests und Versuche mit unterschiedlichsten Anordnungen, Beleuchtungsverfahren und Vorverarbeitungsalgorithmen durchgeführt. Für das favorisierte Konzept wurde nun der Aufbau im Detail geplant und umgesetzt. Am Testsystem wurde dieser nun in nächster Optimierungsschleife wieder ausprobiert und weiter im Detail verbessert. Im Ergebnis waren nun optische Aufnahmen in der erforderlichen Qualität möglich. Diese waren in der weiteren Projektbearbeitung die Basis für die Entwicklung der Algorithmen für die Bewertung der definierten Qualitätskriterien.

Nachdem die Ergebnisse am Testsystem und mit den Testbauteilen zufriedenstellend waren, wurde damit die Entwicklung der QS-Einheit abgeschlossen.

6.2.6 Konzeptentwicklung für die Prozesssteuerung

Im Wesentlichen wurde die Steuerungsentwicklung vom Fraunhofer IPT übernommen. Basierend auf einer SPS der Fa. Beckhoff werden alle Einzelfunktionen angesteuert und die übergeordnete Kommunikation zwischen den Partnern übernommen, siehe Abbildung 12. Außerdem wird eine integrierte Safety-Steuerung implementiert. Als Bedienoberfläche ist eine Beckhoff *TwinCAT PLC HMI Web* Ansteuerung per Browser geplant.

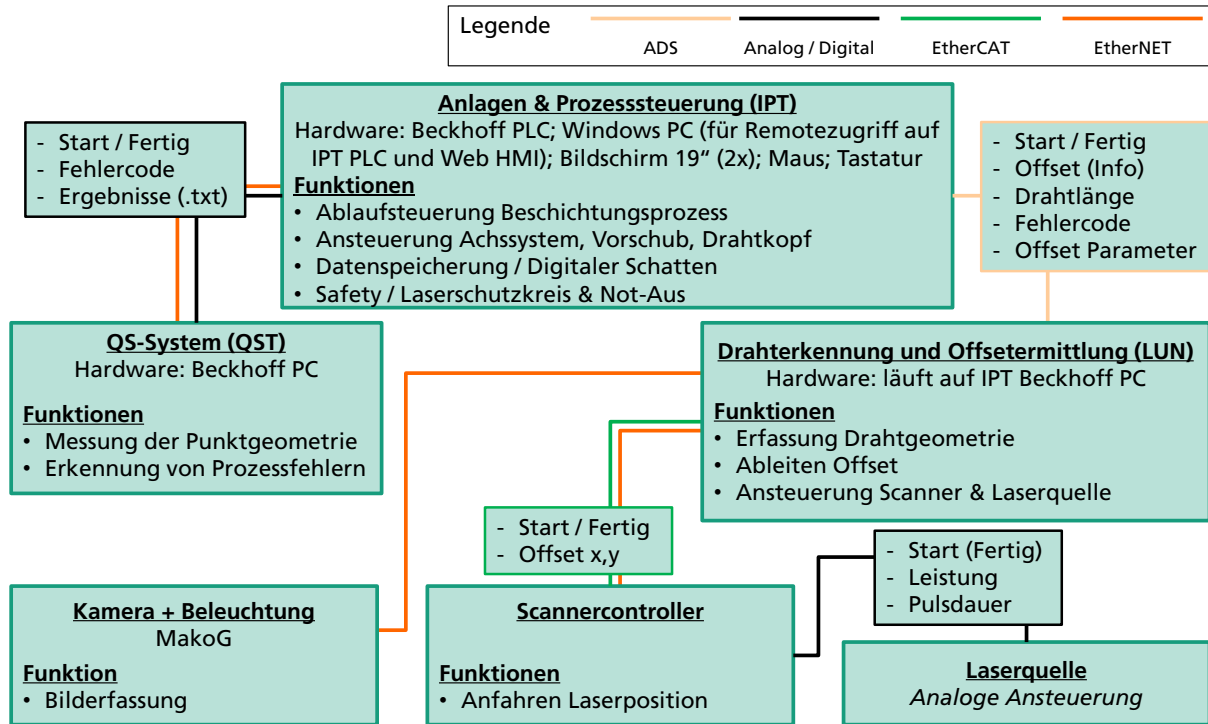


Abbildung 12: Steuerungs- und Schnittstellenkonzept

Da die Laserprozesssteuerung von Fa. Lunovu direkt in die Ablaufsteuerung mit dem 5-Achs-Drahtkopf implementiert werden soll, ist eine entsprechende Schnittstelle zu definieren. Die SPS von Fraunhofer IPT kommuniziert dazu über ADS mit der Software von Lunovu. Das bietet den Vorteil, dass Variablen über Namen angesprochen und Ereignisgesteuert gelesen werden können. Prozesse werden mittels steigender oder fallender Trigger-Flanke gesteuert. Die Ergebnisrückmeldung erfolgt per Hresult entsprechend Abbildung 13.

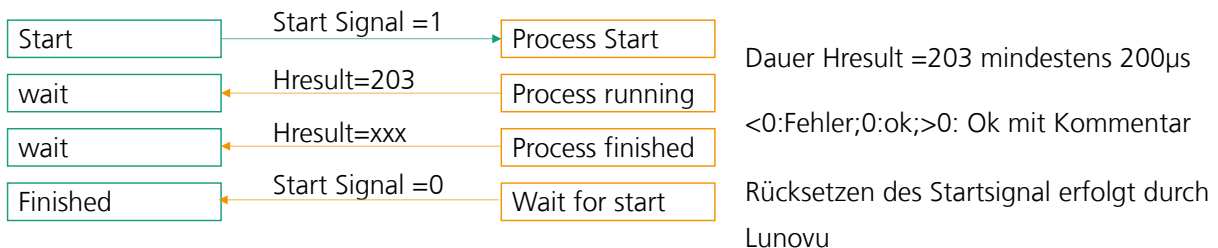


Abbildung 13: Kommunikationskonzept jedes Einzelschritts zwischen Gesamtsteuerung und Laserprozesssteuerung

Als weitere Komponente wird das QS-Modul von Fa. Harms & Wende in das System eingebunden. Das Modul zur optischen Inspektion verfügt über einen eigenständigen Schaltschrank, sodass einfache digitale Signale zur Kommunikation ausgetauscht werden können, Abbildung 14. Dabei wird ein Trigger vom Fraunhofer IPT gesendet und der Auswerteprozess gestartet. Von Harms & Wende werden einerseits zweimal der Fortschaltkontakt gesendet, welcher den beendeten Auswerteprozess signalisiert. Andererseits wird parallel der Status NiO bei „high“ von beiden Kameras gesendet. Die Ergebnisdatei und die Bilder mit den ermittelten Kennwerten wird entsprechend lokal gespeichert.

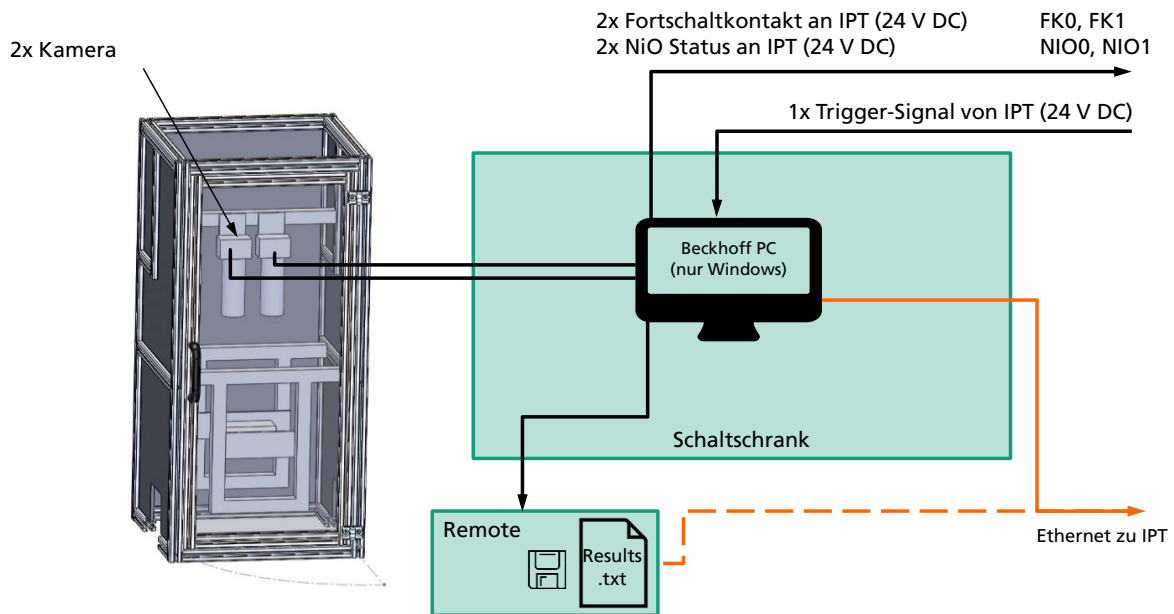


Abbildung 14: Kommunikationskonzept QS-Modul

6.3 AP3 – Konstruktion und Fertigung der Teilsysteme

Das Arbeitspaket 3 umfasst die konstruktive Ausdetaillierung der Konzepte bis hin zur Fertigung der Komponenten und insbesondere der Demonstratorbauteile.

6.3.1 Modulare Stanzwerkzeuge

Carl Dillenius konstruierte das modulare Folgeverbundwerkzeug sowie alle Vorrichtungen zur Herstellung des ersten Demonstratorbauteils, der Schleiffinger. Die modulare Werkzeugkonzeption bringt dabei einige Vorteile: So können aus einem Grundwerkzeug durch unterschiedliche Kombinationen von Stempeln mehrere verschiedene Varianten, sowohl vereinzelt Teile oder am Streifen, jeweils flach oder gebogen, gefertigt werden (siehe Abbildung 15). Daraus ergeben sich neben Kostenvorteilen auch eine verbesserte Präzision bei gleichzeitig optimierter Ergonomie und Arbeitssicherheit. Die Detail-Konstruktion wurde vor der mechanischen Umsetzung final mit den Partnern abgestimmt. Nach der Freigabe erfolgte die mechanische Bearbeitung der Werkzeug-Einzelteile, wie Platten, Stempel und Führungselemente. Daraufhin erfolgten die Montage und iterative Abstimmung des fertigen Werkzeuges.

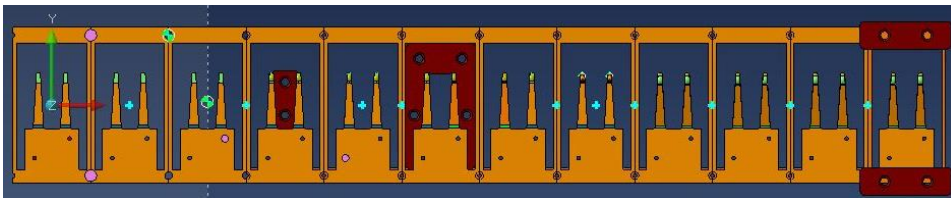


Abbildung 15: Streifenlayout (Carl Dillenius)

Konstruiert und gebaut wurde schließlich ein Folgeverbundwerkzeug mit zehn modularen Stationen. Dies ist am Streifenlayout (Abbildung 15) und an der in Abbildung 16 zu sehenden Werkzeug Ober- und Unterteile erkennbar. Der Aufbau dieses Stanzwerkzeuges ist standardisiert und umfasst eine Kopf- und eine Grundplatte, über welche die Verbindung des Werkzeuges zur Stanzmaschine gesichert wird. Die im Drahterosionsverfahren hergestellten Stempel werden in einer Halteplatte positioniert und verankert. Durch eine Führungsplatte werden die Stempel positionsgenau auf den Stanzstreifen geführt. Durch Öffnen und Schließen des Werkzeuges erfolgt die eigentliche Stanzung. Im Zustand des geöffneten Werkzeuges wird der Stanzstreifen eine Position (Folge) nach vorne geführt und das Werkzeug wieder geschlossen. Dies führt zu einer weiteren Stanzung, d.h. Bearbeitung des Folge-Werkstücks. Das eingesetzte Stanzwerkzeug umfasste mehrere Stanz- und Biegefolgen.

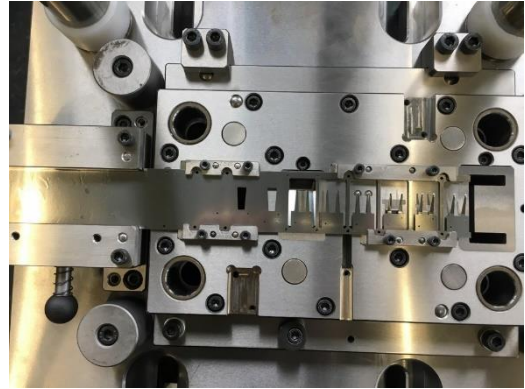
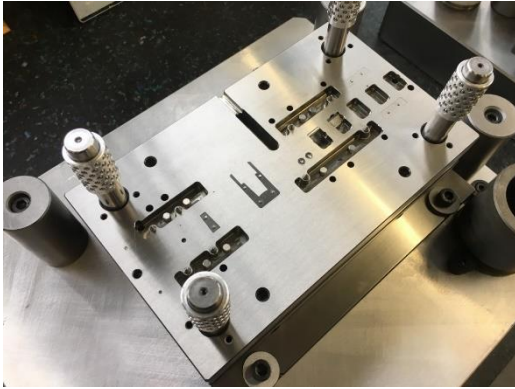


Abbildung 16: Modulares Stanzwerkzeug: Links: Werkzeug-Oberteil; Rechts: Werkzeug-Unterteil

Von der Projektleitung wurde zur einfacheren Versuchsdurchführung sowohl die Herstellung von Einzelteilen als auch die Herstellung von im Stanzstreifen integrierten Stanzteilen gewünscht. Zusätzliches Ziel war die Herstellung von flachen Stanzteilen ohne Biegung als auch von Teilen mit Biegung in einem Werkzeug. Dies konnte durch die modulare Anordnung der Stempel im Stanzwerkzeug erzielt werden. Je nach Einbauposition der Stempel konnten alle gewünschten Werkstücke durch unterschiedliche Kombinationen von Stempeln in einem Grundwerkzeug hergestellt werden. Herausforderung dabei war die korrekte Auslegung der Anlagekraft und Kappenkrümmung für eine optimale Kontaktierung.

Parallel zur Werkzeugentwicklung bei Carl Dillenius wurde auch bei Inovon nach dem gleichen Prinzip das Stanzwerkzeug zur Herstellung des zweiten Demonstratorbauteils, der Schnappscheibe, entworfen und nach finaler Freigabe gefertigt (Abbildung 17).

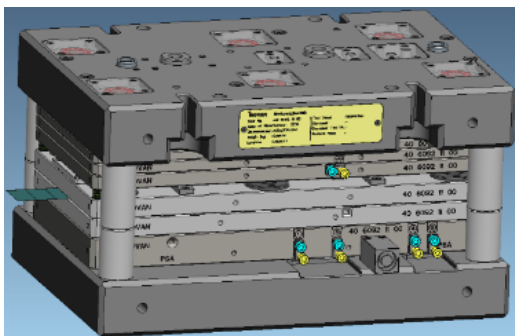


Abbildung 17: Schnappscheiben-Werkzeug (CAD links, Real rechts)

6.3.2 Fertigung der Demonstratorbauteile

Im nächsten Schritt konnte die Fertigung der Stanzteile begonnen werden. Zunächst fertigte Carl Dillenius Einzelteile und Teile am Streifen ohne Biegung. Die auf diese Weise hergestellten Stanzteile sind flach gehalten, was die Positionierung der Optik im Versuchsstand im ersten Schritt deutlich erleichtert. Nachdem das Edelmetall im eigentlichen GreenCoating-Prozess aufgetragen worden ist, können in einem weiteren Arbeitsgang die erforderlichen Biegungen im selben Stanzwerkzeug vorgenommen werden.

Zur Herstellung der Stanz-Rohteile wurde das modulare Stanzwerkzeug in eine Exzenterpresse eingespannt und der zugeschnittene Blechstreifen über einen zu beschaffenden Richtapparat und einen speziellen Walzenvorschub zugeführt. Nur dadurch konnte das definierte Federstahl-Band der Materialstärke 0,1 mm und Breite 40 mm in äußerst planem Zustand dem Werkzeug prozesssicher zugeführt werden. Im ersten Schritt wurden die modularen Stempelinheiten im Werkzeug so eingebaut, dass einzelne Stanzteile hergestellt werden konnten. Im zweiten Schritt wurde das Werkzeug umgebaut, so dass nun am Stanzstreifen fixierte Stanzteile gefertigt wurden (Abbildung 18). Der hergestellte Demonstrator und der Demonstrator-Streifen entsprachen valide den zuvor durch die

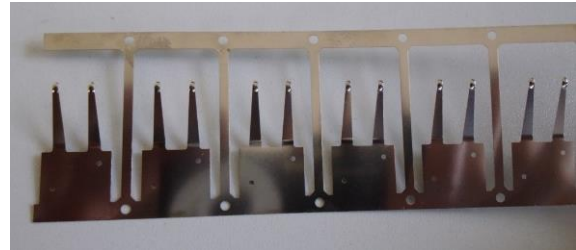


Abbildung 18: Gestanzte Bauteile: Einzelteil links, Bauteile im Streifen rechts

Projektpartner definierten Anforderungen. Hergestellt wurden 7.000 Stück Schleifkontakte mit Kuppe „flach“ und 1.000 Stück Schleifkontakte mit Kuppe „gebogen“.

Auch Inovant fertigte wie vom Konsortium beschlossen die Schnappscheiben. Zusätzlich wurden diese, dem im Hause Inovant üblichen Lebensdauertest inkl. Prüfbericht unterzogen. Da die Schnappscheibe sich maßlich deutlich von den Serienartikeln unterscheidet, musste die Aufnahme für den in Abbildung 19 gezeigten Prüfstand für den Test eigens angefertigt werden. Für den Test wurde die Schnappscheibe eingespannt und die Anzahl der Betätigungen bis zum Versagen ermittelt. Die Prüfung wurde über 2.000.000 Zyklen ohne Materialbruch an unbeschichteten Schnappscheiben durchgeführt und dann beendet. Durch die Betätigung entsteht eine Mikrobewegung an den Kontaktpunkten durch die Ausdehnung der Schnappscheibe. Die so gefertigten Demonstratoren konnten nun zunächst durch das Fraunhofer IPT in der Versuchsanlage beschichtet werden und anschließend vom Projektpartner Inovant umfangreichen Bauteilprüfungen unterzogen werden.



Abbildung 19: Schnappscheiben Lebensdauertprüfstand

6.3.3 Technischer Aufbau der realisierten optischen Inspektion

Der finale technische Aufbau der Bildverarbeitung, später mit BV-Inspektionsbox betitelt, wurde aufgrund des begrenzten Bauraums im Prüfstand sehr kompakt gehalten. Dies ergab sich aus gemeinsamen Gesprächen und in Zusammenarbeit der einzelnen Projektpartner, hauptsächlich aber mit dem Fraunhofer IPT.

Die Hülle wurde aus Industrieprofilen in Baukastenart erstellt. Somit ist ein nachträgliches Verändern oder aber auch Anbauen von Zusatz-Komponenten möglich. Weiterhin wurden die Wände der Hülle mit lichtundurchlässigem Material (PS-Platten in schwarz) verschlossen. Dies soll Schutz vor eventuell einfallendem Streulicht aus der Anlage selbst, aber auch durch Umgebungsquellen bieten. Serviceöffnungen im Front- und Dachbereich der Hülle sollen einen einfachen Zugriff auf die verbauten bildverarbeitenden Komponenten, später mit BV betitelt, gewähren.

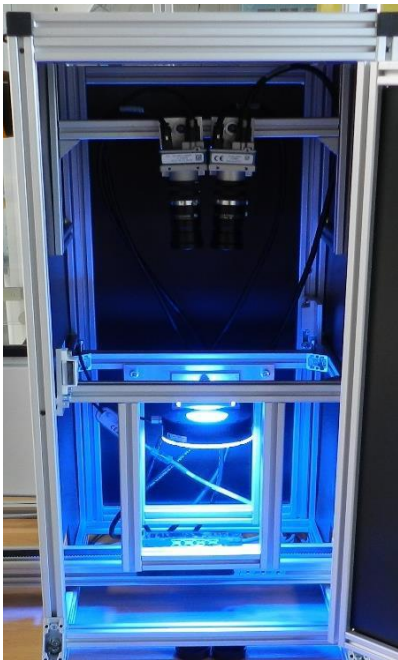


Abbildung 21: Hülle offen



Abbildung 20: Hülle geschlossen

Die optischen Komponenten sind zwei Kameras, welche versetzt und in einem definierten Winkel zueinander platziert sind. Diese sind dabei auf einem Schlitten montiert, welcher ein Justieren bzw. Ausrichten in x-y-z-Lage ermöglicht. Bei den, durch Vorversuche ausgewählten Kameras, handelt es sich dabei um sogenannte Nano-Kameras vom Typ *Genie Nano M4020*, vgl. Abbildung 22.



Abbildung 22: Verbauter Kameratyp

Die zum Einsatz kommende und verbaute Beleuchtung besteht aus zwei unabhängigen Lichtquellen. Die optimale Ausleuchtung der zu überwachenden Bauteile geschieht jetzt mit einem Ringlicht sowie Koaxiallicht.

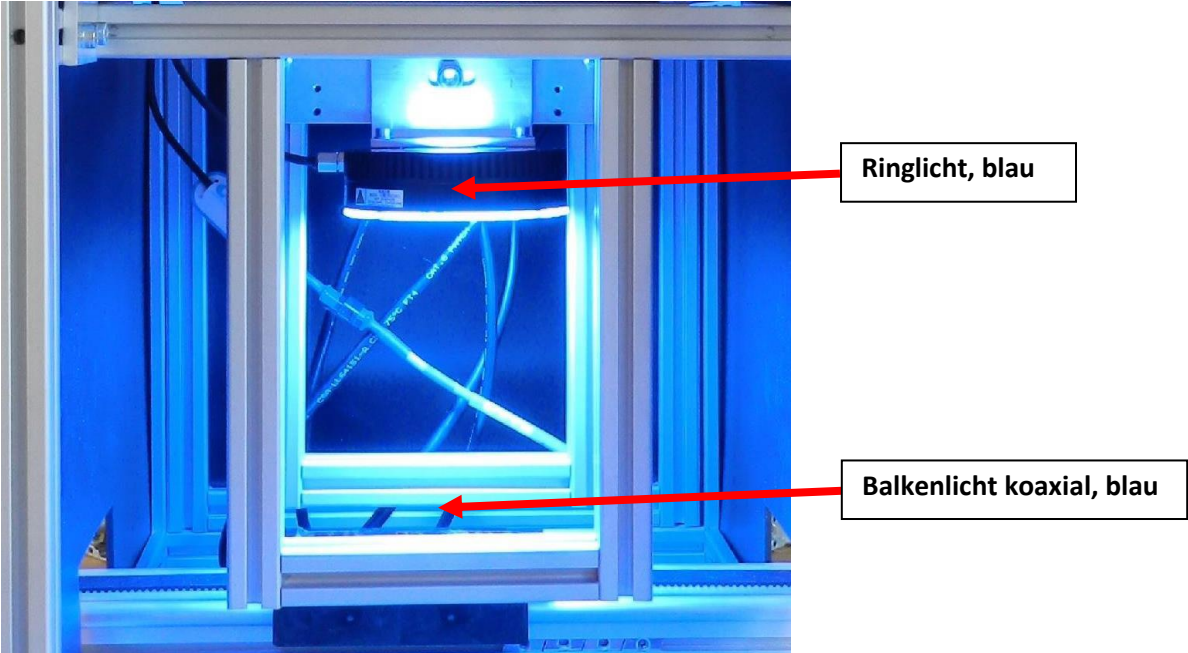


Abbildung 23: Aufbau Beleuchtung

Der Schaltschrank, beinhaltet den erforderlichen Industrie PC sowie die elektrischen Komponenten für das Betreiben der kompletten BV-Inspektionsbox. Aller technischen, konstruktiven und elektrischen Auslegungen sind auf einem Stand Alone System geschehen.

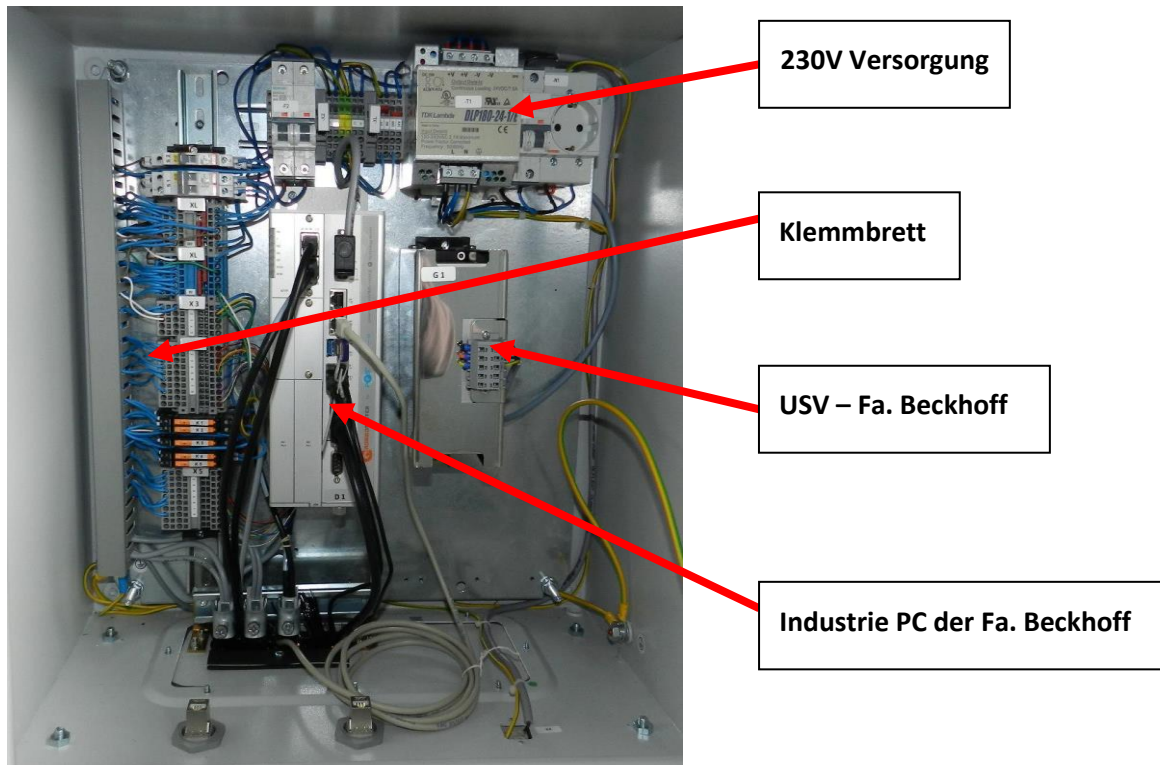


Abbildung 24: Schaltschrank komplett bestückt

6.3.4 Entwicklung der Steuerung

Nach dem Austritt des Partners F&K Delvotec aus dem Konsortium übernimmt das Fraunhofer IPT die Steuerungsentwicklung und setzt dafür ein entsprechendes Kommunikationskonzept gemäß Kapitel 6.2.6 auf. Während der Projektlaufzeit konnte somit eine webbasierte Maschinensteuerung entwickelt werden, welche zusätzlich die Möglichkeit einer Datenbankanbindung aufweist. Dementsprechend können detaillierte Auswertungen aller Prozessparameter durchgeführt und Korrelationen zwischen Prozesseingabeparametern, Maschinen- und Systemdaten sowie den ermittelten qualitativen Kennwerten der Bauteilbeschichtung hergestellt und analysiert werden. Diese Funktionalität konnte jedoch nicht mehr im Bearbeitungszeitraum des Projekts geprüft werden. Eine nachgeschaltete tiefgehende Fortführung und Bearbeitung steht aus.

Die Steuerung verfügt über drei Bedienebenen, wobei zunächst die Einstellungsebene für die Eingabe aller System- und Bauteilparameter herangezogen wird. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Konfigurationsdateien abzuspeichern oder zu laden. Die nächste Steuerungsoberfläche deckt den Einrichtbetrieb ab (Abbildung 25), wobei sämtliche Einzelfunktionen getestet werden können. Analog zu den Einzelsystemen sind vier Gruppen für den Blechvorschub, den 5-Achs-Drahtkopf, die Laserprozesssteuerung sowie die optische Inspektion verfügbar. Als dritte Ebene agiert der Automatikmodus, wobei die Anzahl der zu beschichtenden Bauteile eingegeben werden kann. Eine vollautomatisierte Beschichtung startet entsprechend.

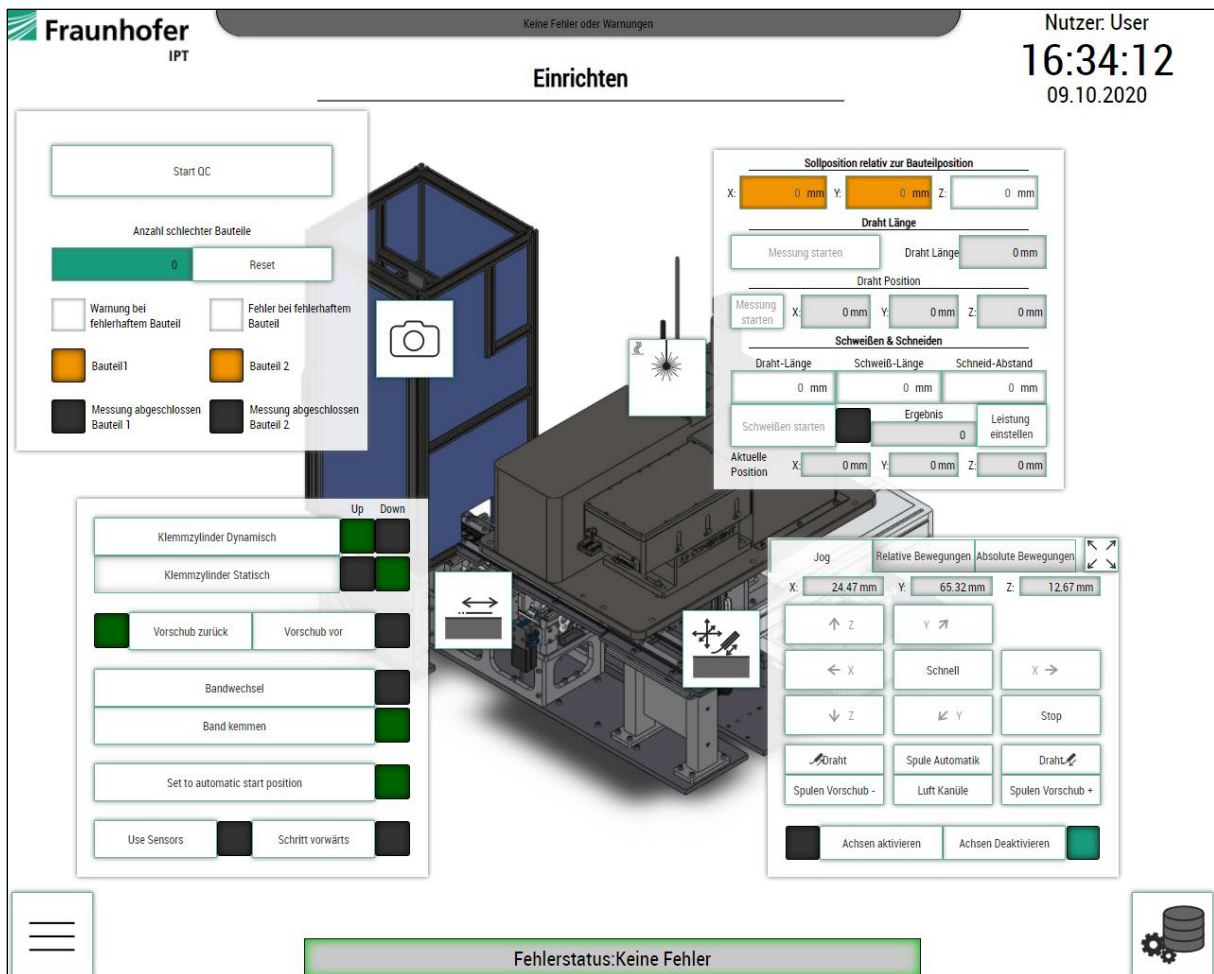


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung des Bedienoberfläche zum Einrichtbetrieb

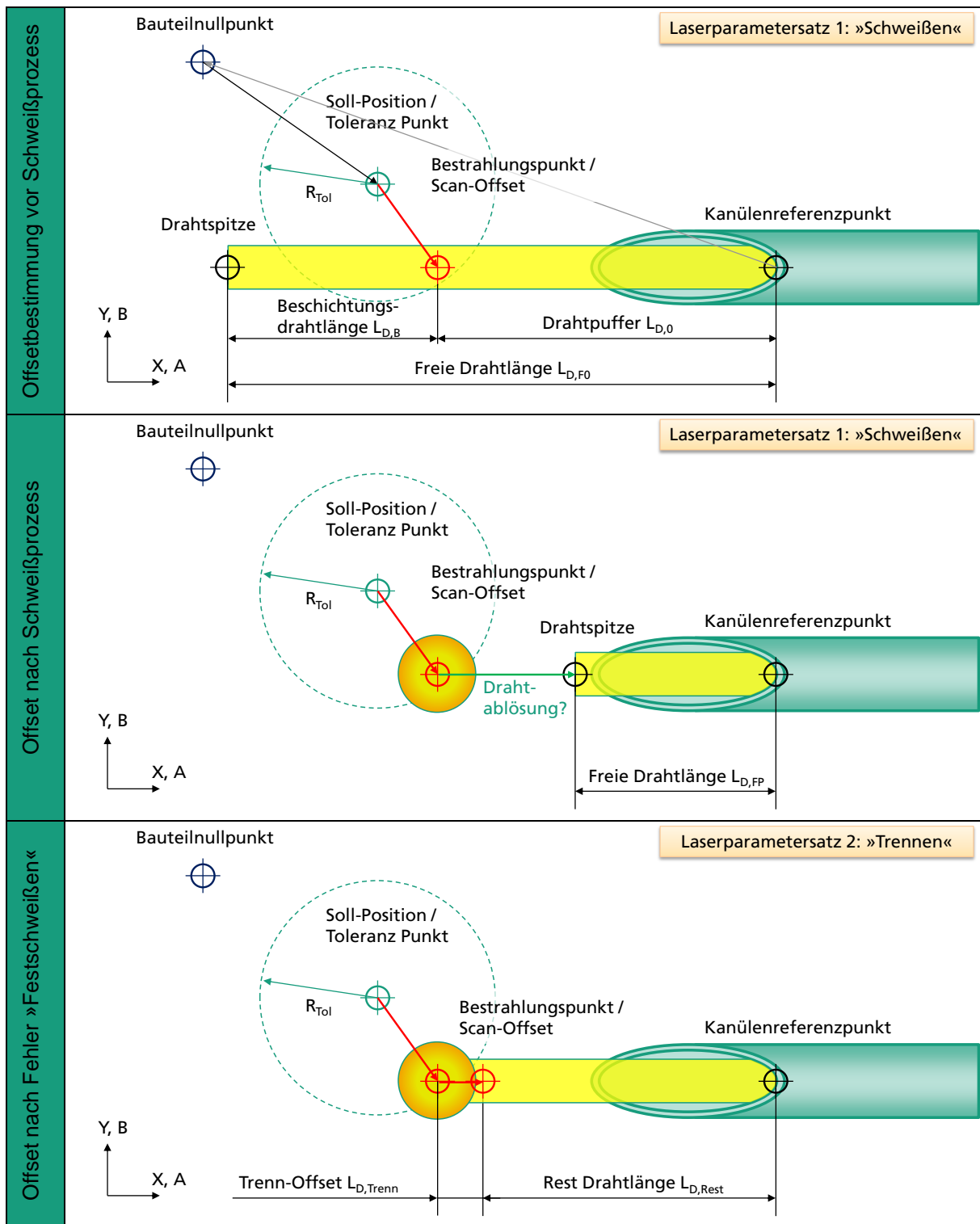
6.3.5 Laserprozesssteuerung

Die Anforderungen an den neu eingestiegenen Partner Lunovu wurden durch die generellen Prozessanforderungen aus AP1 sowie durch das Fraunhofer IPT definiert, siehe Tabelle 2. Daraus abgeleitet können mehrere Einzelprozesse wie folgt abgeleitet werden:

- Drahtlänge messen
- Drahtposition ermitteln
- Schweißprozess
- Trennprozess

Dabei stehen die On-Axis-Prozessbeobachtung durch den Strahlengang des Scanners sowie eine Kamera zur Verfügung. Mittels Bilderkennung sind entsprechende Offsets zu erkennen und in den Laserprozess einzubinden.

Tabelle 2: Anforderungen an den Laserprozess von Lunovu



Legende:

Freie Drahtlänge vor Schweißen	$L_{D,F0}$	Gesamtdrahtlänge von Drahtspitze bis Kanüle vor dem Schweißprozess
Beschichtungsdrahtlänge	$L_{D,B}$	Vorgegebene abzuschmelzende Drahtlänge
Drahtpuffer	$L_{D,0}$	Drahtzugabe zur aufzuschweißenden Drahtlänge bis zur Kanüle
Toleranzradius	R_{Tol}	Zulässige Abweichung zwischen Soll-Position des Schweißpunkts und der Scan-Offset-Position
Freie Drahtlänge nach Schweißen	$L_{D,FP}$	Gesamtdrahtlänge von Drahtspitze bis Kanüle nach dem Schweißprozess
Trenn-Offset	$L_{D,Trenn}$	Abstand vom Trennschnitt zum Goldmittelpunkt
Rest Drahtlänge	$L_{D,Rest}$	Restdrahtlänge nach Trennprozess

Um die Kalibrierung des Scanners zu überprüfen werden zwei Quadrate jeweils mit einer Seitenlänge von 20 mm und 7,07 mm in der Scannersoftware erstellt und mit dem Laser auf einem Metallblech markiert. Die Markierung wird dann unter dem Mikroskop gemessen, Abbildung 26.

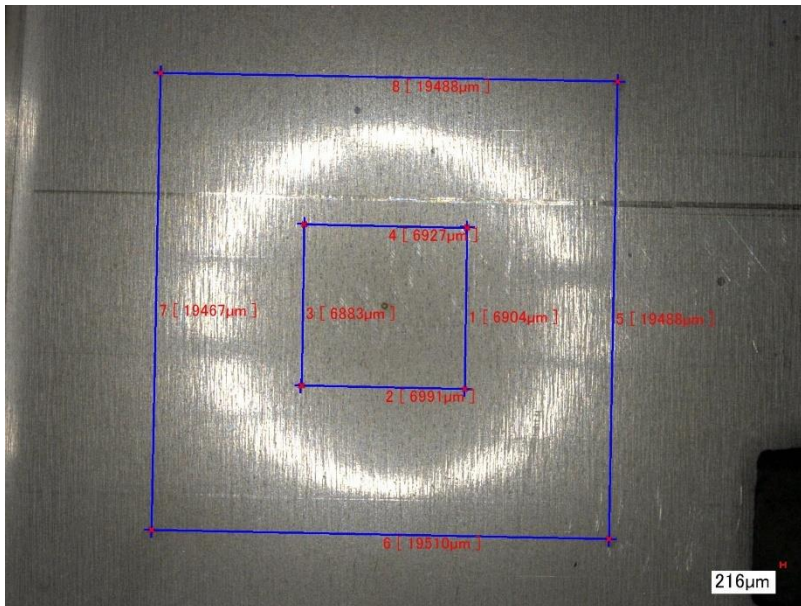


Abbildung 26: Messung der Markierung unter dem Mikroskop

Um die Kamera zu kalibrieren wird eine Maßreferenz unter der Kamera positioniert. Ein Bild wird aufgenommen und die Anzahl der Pixel zwischen den Längeneinheiten wird berechnet. Mit der aktuellen Konfiguration entsprechen 640 Pixel 3 mm im realen Prüfstand. Damit ergibt sich der Faktor „mmPerPixel“ zu 0.0046875.

Für die Drahtlängenmessung wurde zu Beginn der Entwicklung die Methode der Bildverarbeitung mit OpenCV eingesetzt. Wegen Schwierigkeiten mit der Bildverarbeitung die Kanüle zu erkennen, wurde die Drahtlängenmessung schließlich mit der Unterstützung des Benutzers umgesetzt. Dazu wird in der GUI das Kamerabild angezeigt, wobei der Benutzer mit der Maus von der Drahtspitze bis zu Kanüle ein Längenmaß zieht. In diesem Vorgang wird die Pixelposition beim Anklicken und Freilassen der Maustaste in der Lunovu Control Software aufgenommen. Der Abstand zwischen diesen beiden Pixelpositionen wird zur Drahtlänge umgerechnet. Diese Methode ist sehr zuverlässig und liefert ein Ergebnis mit hoher Genauigkeit.

Für die Drahtoffsetbestimmung wird ebenfalls die Methode der Bildverarbeitung mit OpenCV eingesetzt. Dazu wird das Kamerabild zuerst mit einem Schwellenwert gefiltert. Der eingestellte Schwellenwert hängt von der Helligkeit der Beleuchtung und der Belichtungszeit der Kamera ab. Im gefilterten Bild ist der Draht gut erkennbar, Abbildung 27.

Danach wird die Kontur des Drahtes mittels der OpenCV Funktion „findContours“ berechnet, siehe Abbildung 27. Diese Funktion verwendet den Algorithmus von Satoshi Suzuki et. Al. [6].

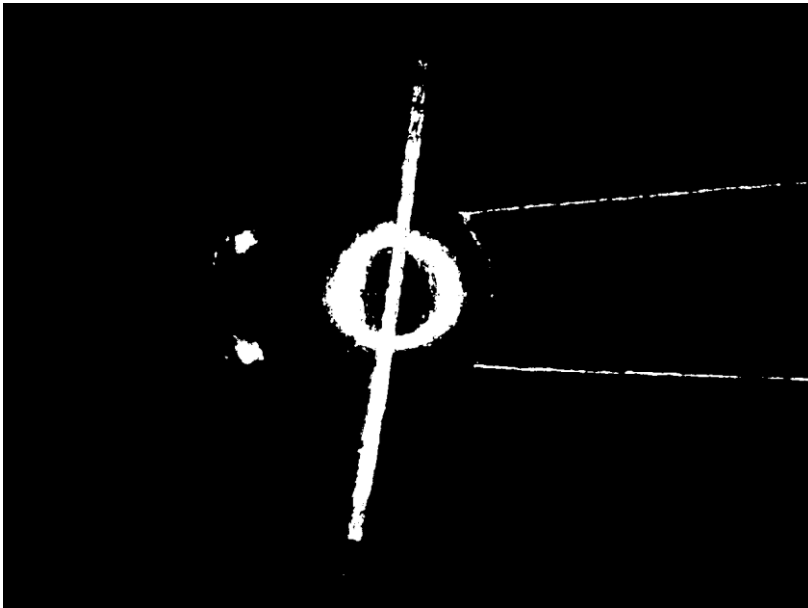


Abbildung 27: Kamerabild gefiltert mit einem eingestellten Schwellenwert von 158

Im nächsten Schritt wird die Position der Drahtspitze bestimmt. Die Berechnung erfolgt durch Vergleich des y-Koordinatenwertes aller Kontursegmente. Das Kontursegment mit größtem y-Wert zeigt die Drahtspitze, weil der Draht von oben in das Kamerakoordinatensystem gefördert wird.

Zum Schluss wird das Drahtoffset bestimmt. Das wird mittels OpenCV Funktion „moments“ berechnet. Diese Funktion verwendet den Algorithmus der Green-Riemanschen Formel von George Green [7].

Die Drahtoffsetbestimmung lieferte gute Ergebnisse mit Test-Bildern, siehe Abbildung 28. Ob die Erkennung im realen Prozess zuverlässige Ergebnisse liefert, ist noch ungetestet.

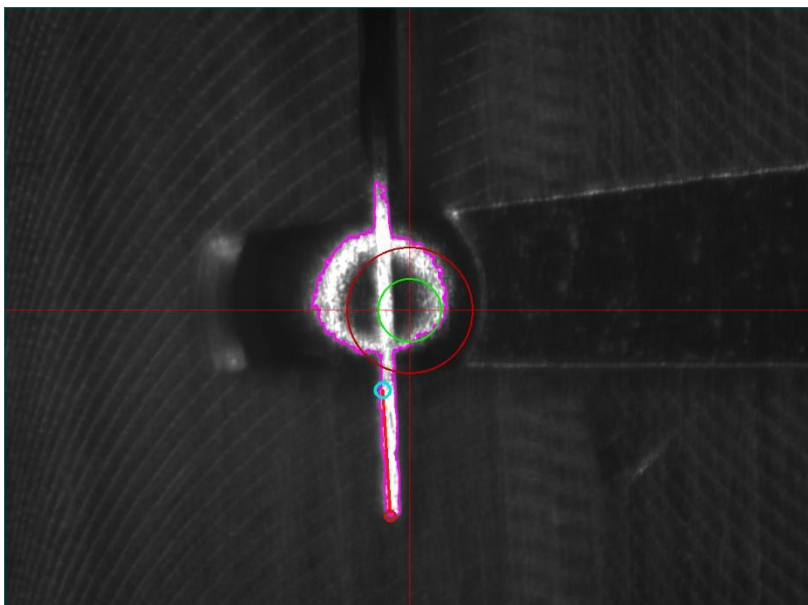


Abbildung 28: Darstellung der erkannten Drahtspitze und des berechneten Drahtoffsets

6.4 AP4 – Aufbau und Inbetriebnahme des Gesamtsystems

Nach der Komplettierung aller Einzelsysteme und Baugruppen erfolgte die Inbetriebnahme am Fraunhofer IPT. Dabei wurden zunächst partnerspezifisch die Baugruppen im Prüfstand sowie die übergeordnete Kommunikation als Gesamtsystem in Betrieb genommen. Abbildung 29 zeigt den generellen Aufbau des GreenCoating-Systems mit all seinen Komponenten.



Abbildung 29: Finaler mechanischer Aufbau

Durch das Fraunhofer IPT wurde nach erfolgreicher mechanischer und elektrischer Montage die Steuerung und die HMI (Human Machine Interface) auf dem Prüfstand aufgespielt und integriert. Harms & Wende verknüpfte in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPT das QS-Modul mit der Steuerung des restlichen Prüfstandes. Zum Schluss wurde die Laserprozesssteuerung durch Lunovu implementiert.

6.5 AP5 – Prozessentwicklung

Im Rahmen der Prozessentwicklung wurde zunächst eine Einflussanalyse durchgeführt und wesentliche zu variierende Parameter identifiziert. Das Ziel ist dabei das fehlerfreie Aufschiweißen der Goldpunktbeschichtung. Die entsprechenden Parameter sind Abbildung 30 zu entnehmen.

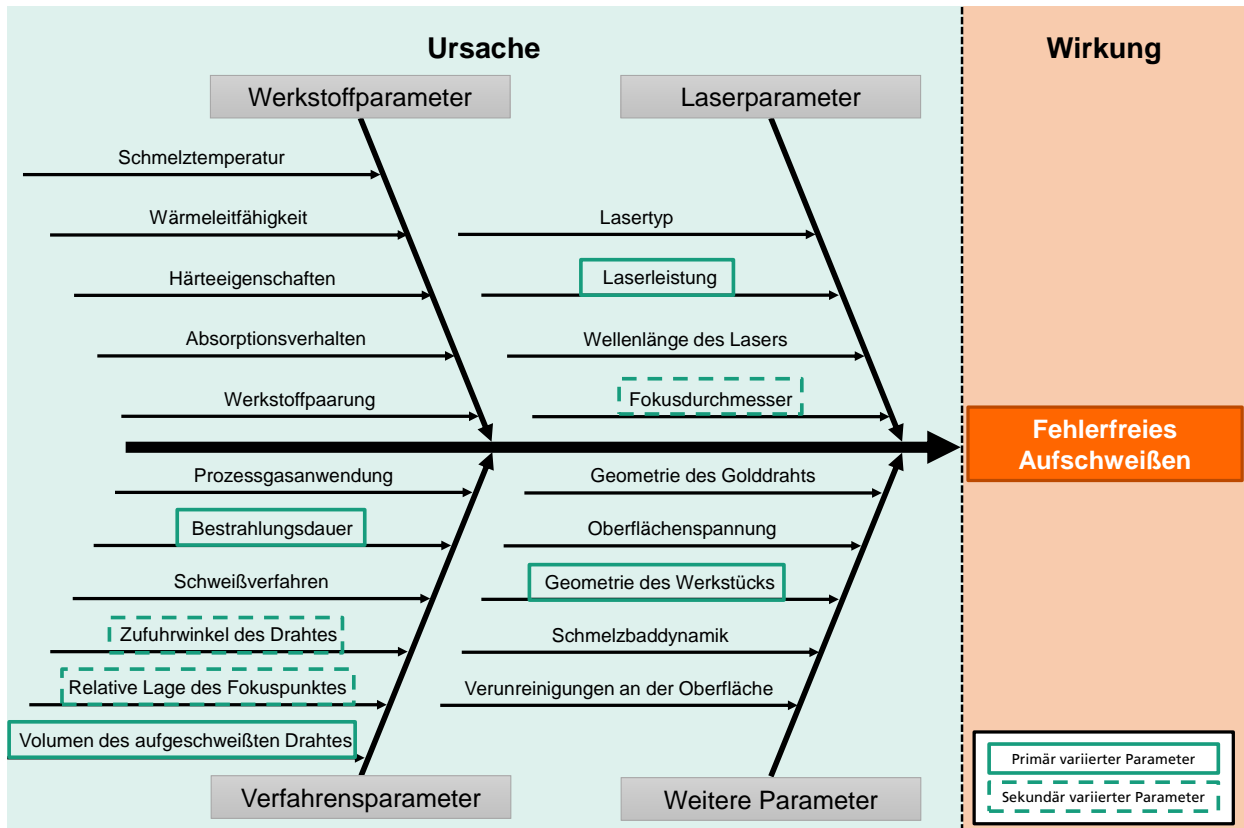


Abbildung 30: Ishikawa-Diagramm

Mittels einer Studie zum Energieeintrag bei verschiedenen Laserparametern auf dem Substrat ließen sich erste Abgrenzungen der Schweißparameter durchführen und ein Parameterfenster festlegen (orangefarbener Bereich, Abbildung 31). Parallel dazu erfolgte eine Spezifikation von Fehlerbildern während des Aufschiweißprozesses. Mittels dieser Fehlerbeschreibung können für die spätere Optimierung und Prozessstabilitätsuntersuchungen entsprechende Vorkehrungen und Gegenmaßnahmen definiert werden.

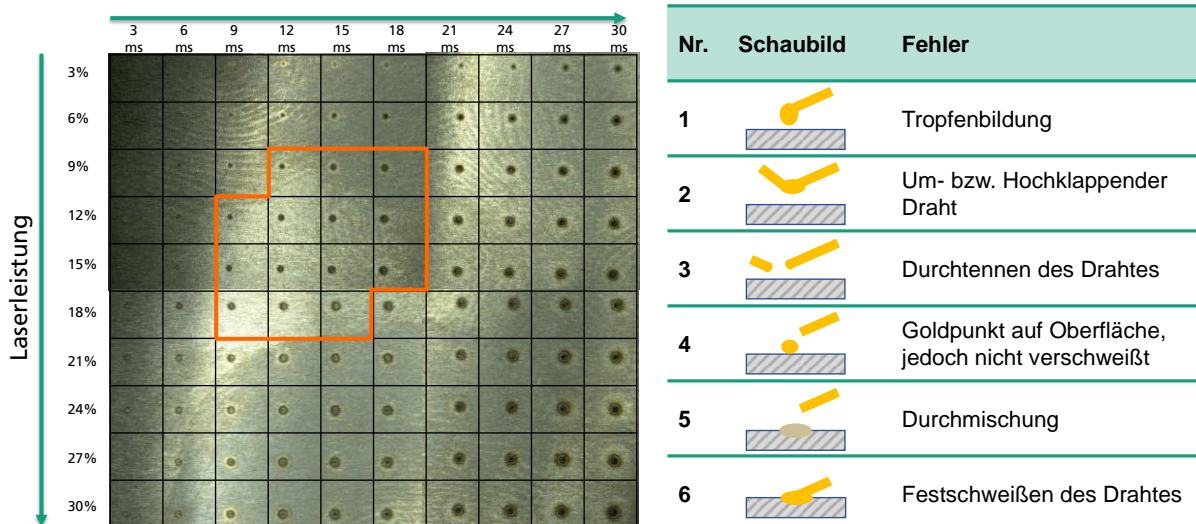


Abbildung 31: Energieeintragsstudie und Spezifikation möglicher Fehlerbilder

Gemäß der Vorauswahl der Prozessparameter aus vorangestelltem Kapitel konnten erfolgreich erste Goldpunkte auf die Schleifkontakte aufgeschweißt werden (Abbildung 32). Die Bauteile wurden dabei am Stanzband beschichtet, während 30 Watt Laserleistung für 10 ms zum Aufschweißen verwendet wurden.

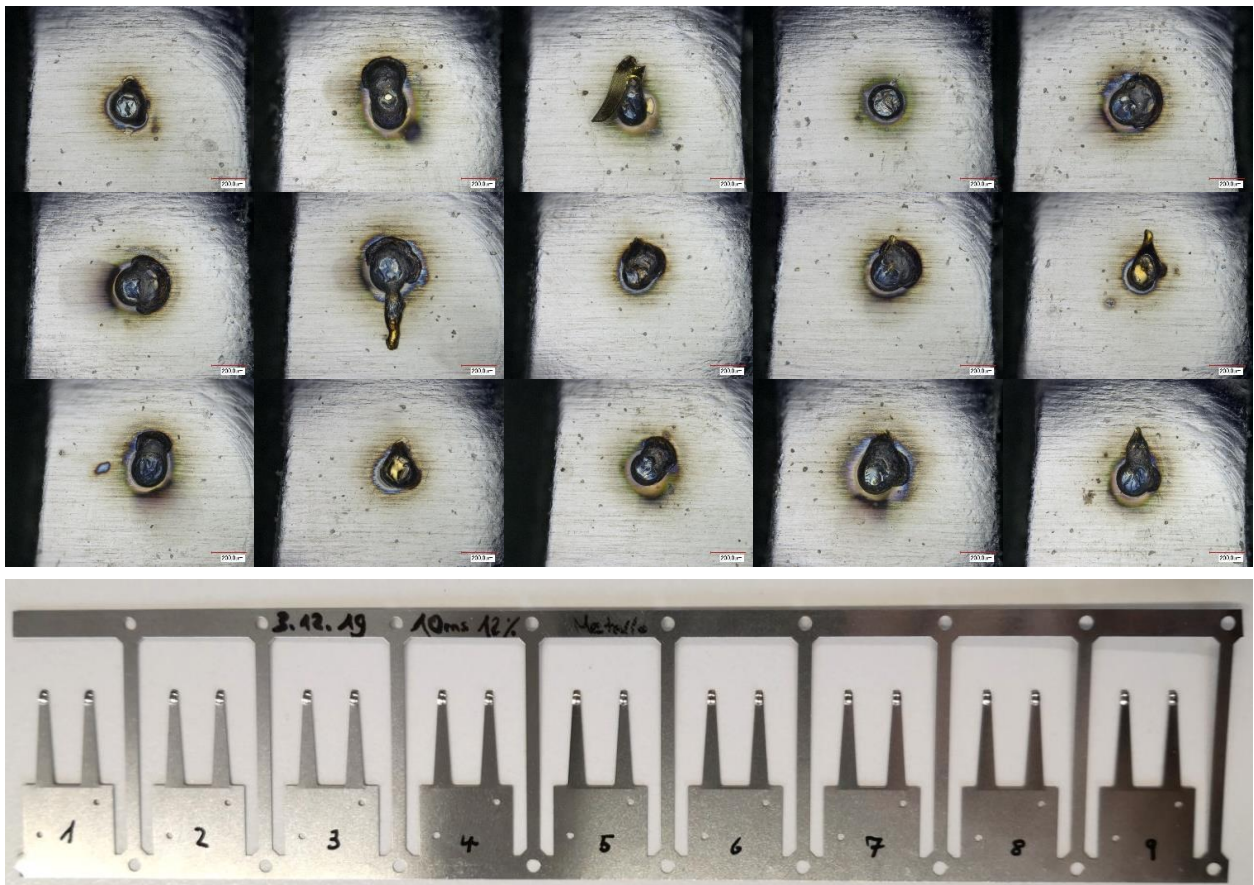


Abbildung 32: Bauteile am Blechband: Schleiffinger beschichtet

Es wurde aber festgestellt, dass es bei einigen Schweißungen zu einem Festschweißen des Golddrahtes am Goldpunkt kam. Dabei wurde außerdem ein Zusammenhang zwischen der Golddrahtlänge und der Position des Golddrahtes relativ zum Bauteil festgestellt. Auch kam

es teilweise zur Bildung einer Goldkugel am Ende des Golddrahtes, die eine weitere Goldpunktschweißung stark behinderte oder gar unmöglich machte (vgl. Fehlerbeschreibung). Dies passierte häufiger, wenn der Draht zu lang oder zu kurz war. Wenn der Draht zu kurz war entstand häufiger eine Kugel am Drahtende, die aber keine Verbindung mit dem Bauteil einging. Gute Ergebnisse ließen sich für einen ca. 1,5 mm langen Golddraht erzielen. Um trotz einer Festschweißung aber den Scheißprozess aufrecht zu erhalten, kommt eine Erkennung über die Prozessbeobachtungskamera und einen Trennschnitt per Laser in die Steuerung zum Einsatz. Für eine detailliertere Prozessentwicklung wurden ausgewählte Goldpunkte mittels Schliffbildern untersucht. Außerdem erfolgt eine Vermessung der Goldpunkte, siehe Abbildung 33.

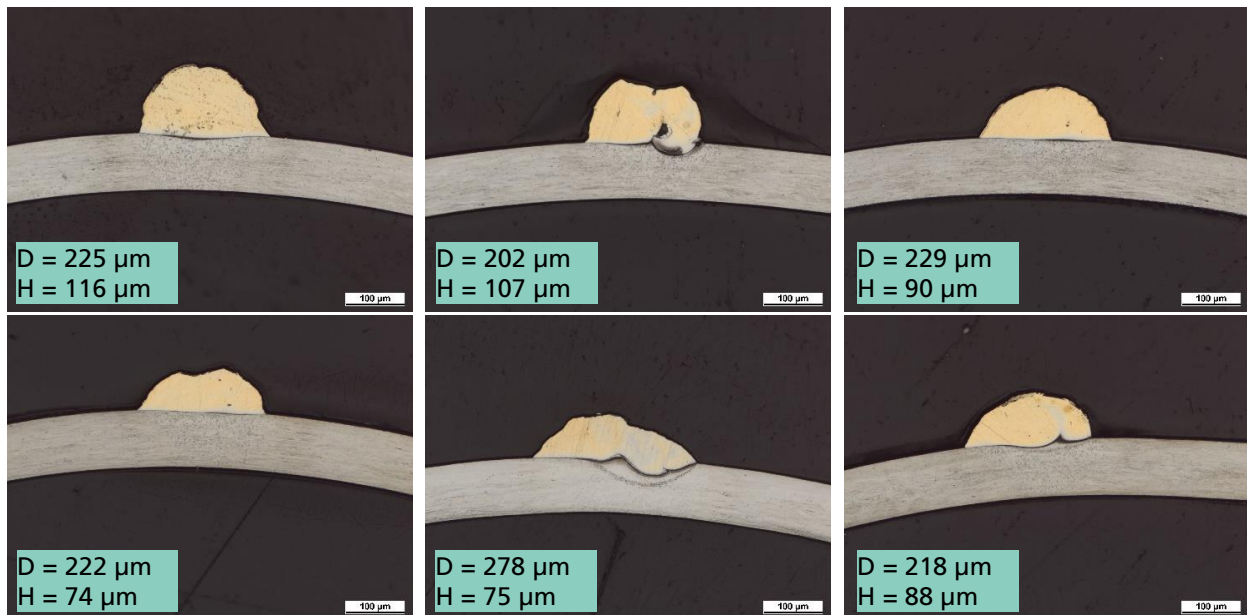


Abbildung 33: Auswahl an Schliffbildern des beschichteten Schleiffingers

Bei den aufgeschweißten Punkten ist jedoch noch eine starke Variation der Punktdurchmesser und -höhe zu erkennen (\emptyset Durchmesser: $D = 229,0 \mu\text{m}$; \emptyset Höhe: $H = 91,7\mu\text{m}$). Eine entsprechende Optimierung der Parameter ist vorzunehmen.

Zusätzlich wurden die Schliffbilder von vier Goldpunkten per Rasterelektronenmikroskop, REM und energiedispersiven Röntgenmikroanalyse, EDX auf die metallische Zusammensetzung untersucht. Das Ergebnis zeigte eine sehr hohe Reinheit des Goldes an der Oberfläche von bis zu 100 m% Au, in der Punktmitte ca. 98 m% Au und einen minimalen Wert von 86,22 m% Au erreichte. In der Punktmitte lagen die Werte zwischen 92,06 m% Au und 100 m% Au. Der geringe Goldgehalt am Punktgrund zeigt die lokale Durchmischung und ist daher ein Indikator für die erfolgreiche Verschweißung der Beschichtungspunkte.

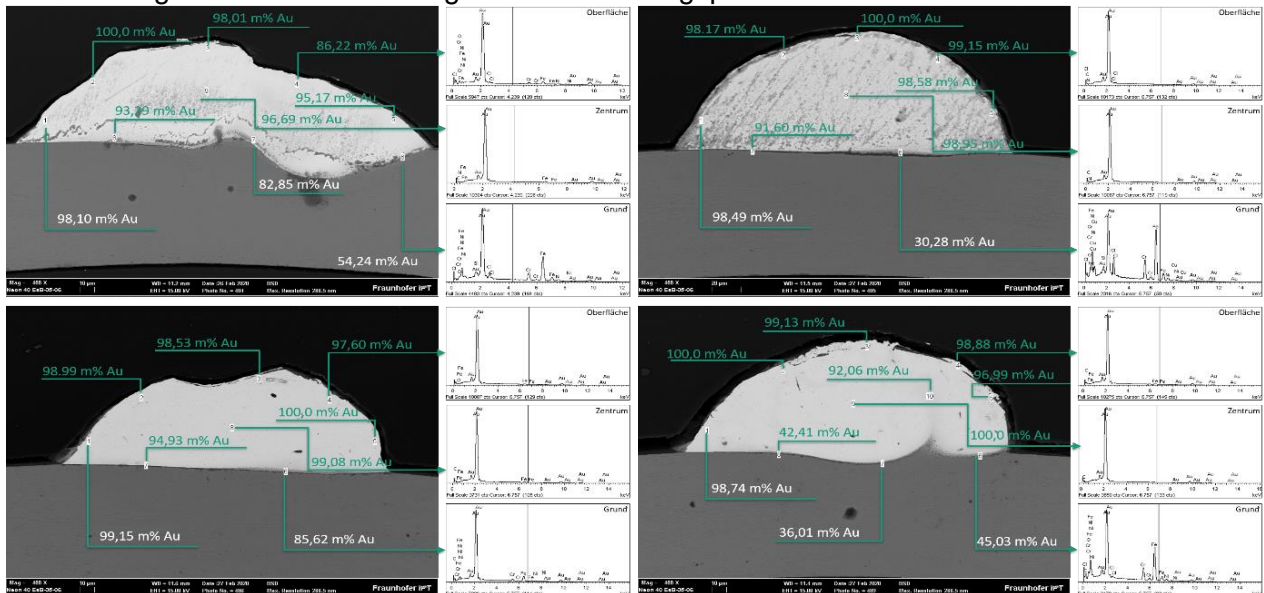


Abbildung 34: Ergebnisse der metallografischen Untersuchung per REM und EDX

Auch für die Schnappscheibe erfolgte parallel die Prozessentwicklung um unterschiedliche Substratgeometrien abzubilden (konvex/konkave Beschichtungsoberflächen). Eine Auswertung der Punkte erfolgte mittels Lichtmikroskopie, Abbildung 35.

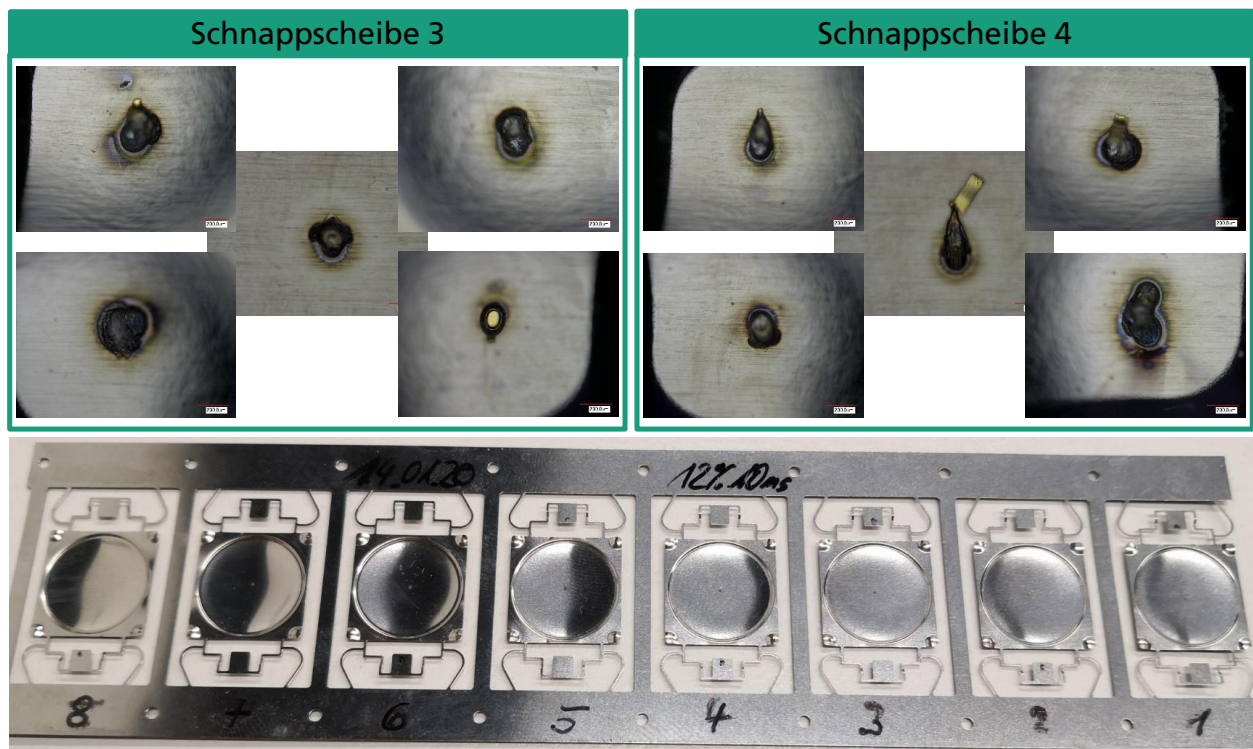


Abbildung 35: Bauteile am Blechband: Schnappscheiben beschichtet

6.6 AP6 – Demonstratorfertigung und Ergebnisvalidierung

6.6.1 Validierung des Beschichtungsprozesses

Die mit Goldpunkt versehenen Kontaktfedern wurden einem Reibverschleißtest unterzogen und das Verhalten mit Federn verglichen, die mit einer für Schleiffinger üblichen Oberfläche veredelt waren. Der Testaufbau bestand aus einem programmierbaren Linearantrieb, der Steuerung und einem Resistomaten mit Laptop für die 4-Leiter Widerstandsmessung (Abbildung 36)

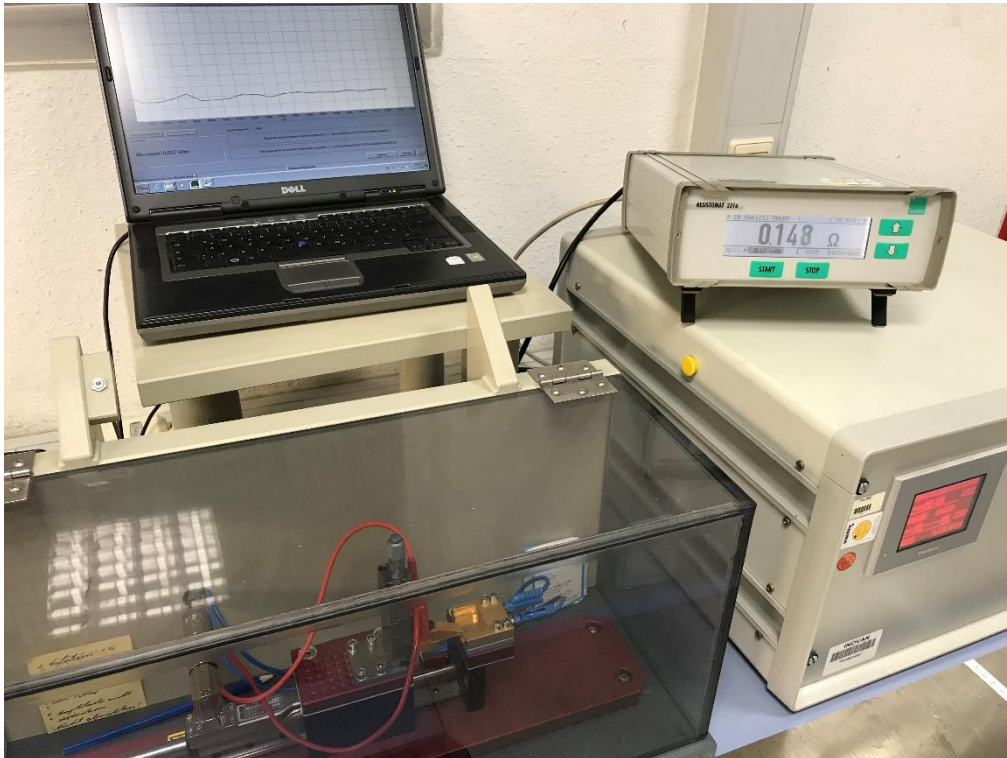


Abbildung 36: Reibverschleißtest, Testaufbau

Die Anzahl der Reibzyklen war einstellbar, wie auch der Reibweg. Im Verlauf des Versuchs wurde nach einer wählbaren Zyklenzahl jeweils der Durchgangswiderstand gemessen. Dazu hielt der Antrieb kurz in einer Endposition an. Die Federvorspannung konnte durch eine Mikrometerschraube eingestellt werden. Um die Federkräfte zu erhöhen, wurde die Klemmvorrichtung der Feder so ausgelegt, dass die freie Länge des Federarmes reduziert war. Damit sollte die Kraft, bzw. die Verschleißneigung erhöht werden, um die Testzeit zu reduzieren. Abb. 14 zeigt einen eingespannten Prüfling.



Abbildung 37: Prüfling, eingespannt

Prüfmittel:

- Tribologie-Prüfstand: Inovan 03.09822400 mit Resistomat Burster 2316
- optische Untersuchung: Keyence Digitalmikroskop VHX 5000

Bedingungen:

- Prüfaufnahmen vergoldet
- Reibpartner: CuZn und Edelstahl, jeweils eine Rauhtiefe Rz von 2 μm
- Federvorspannung: 0,5 mm, entsprechend 0,2 N
- Messstrom: 10 mA
- Messbereich: 20 Ohm
- Reibweg/Zyklus: 30 mm
- Widerstandsmessung alle 20 Reibzyklen

Prüflinge:

- Unveredelte Federkontakte
- Federkontakte allseitig hartvergoldet über Nickel: 4,6 μm AuCo, 20 μm Ni
- Federkontakte mit aufgeschweißtem Au-Punkt

6.6.1.1 Ergebnisse – Edelstahl als Reibpartner

Die Versuche mit veredelten Federn auf einem Edelstahlblech lieferten keine stabilen Messwerte. Durch die Chrom-Oxidschicht, die sich bei Edelstahl schnell und stark ausprägt, war bei geringer Kontaktkraft keine zuverlässige Kontaktierung möglich. In Abbildung 38 links sind die gemessenen Widerstände bis zu 20 Ohm, ohne jedoch

Ausreißer zu zeigen. Wegen der allseitigen Veredelung mit AuCo ist die Kontaktpaarung Au/Edelstahl immer sichergestellt, wenn auch nicht stabil. Abbildung 39 links zeigt die Reibstelle an der Feder. Beim Versuch mit der Feder mit Goldpunkt zeigten sich in Abbildung 38 rechts starke Ausreißer bis in den kOhm-Bereich. Der kleine Goldpunkt erforderte eine sehr genaue Ausrichtung der Feder und genaue Einstellung der Federvorspannung, um die Kontaktierung auf dem Punkt sicherzustellen. Im vorliegenden Versuch wird auch die Kontaktpaarung Edelstahl/Edelstahl aufgetreten sein, die dann die sehr großen Werte für den Durchgangswiderstand verursacht haben wird. Abbildung 39 rechts zeigt die Stelle des Reibkontaktes, deren Ausrichtung nicht optimal war.

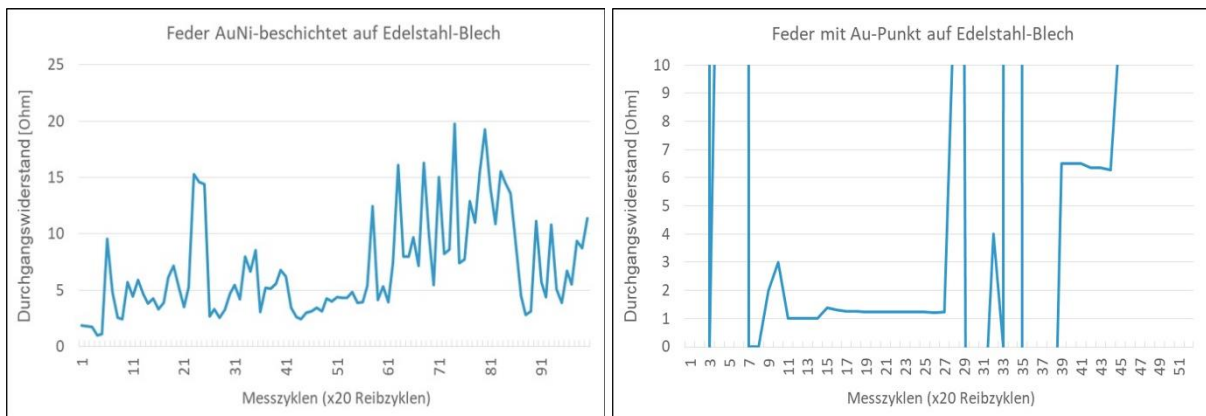


Abbildung 38: Links: Au beschichtete Feder auf Edelstahl. Rechts: Feder mit Goldpunkt auf Edelstahl

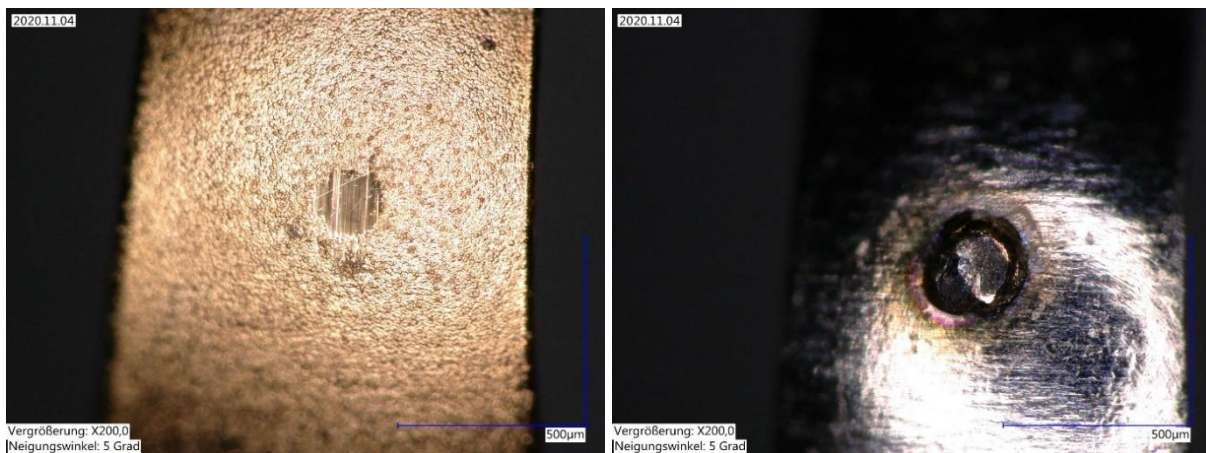


Abbildung 39: Links: Reibstelle an der Au-veredelten Feder. Rechts: Reibstelle Au-Punkt, nicht gut ausgerichtet

Im Versuch mit blanker Feder auf einem Messing-Blech bestätigte sich, das Edelstahl als Reibpartner ungeeignet ist (Abbildung 40). Wegen der immer vorliegenden Paarung Edelstahl/CuZn traten zwar keine Ausreißer auf, aber die Werte für R waren nicht stabil.

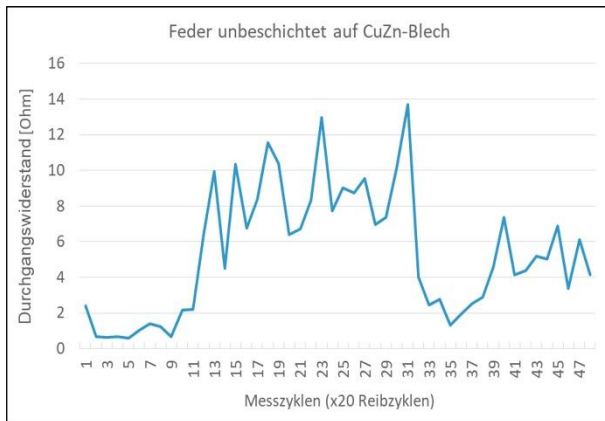


Abbildung 40: Blanke Feder auf CuZn

6.6.1.2 Ergebnisse – Messing als Reibpartner

Eine allseitig veredelte Referenzfeder wurde mit 264.180 Reibzyklen belastet, d.h. 13.209 Messungen des Widerstandes mit einem Mittelwert aus den ersten 1.000 Zyklen von 0,025 Ohm (Abbildung 41).

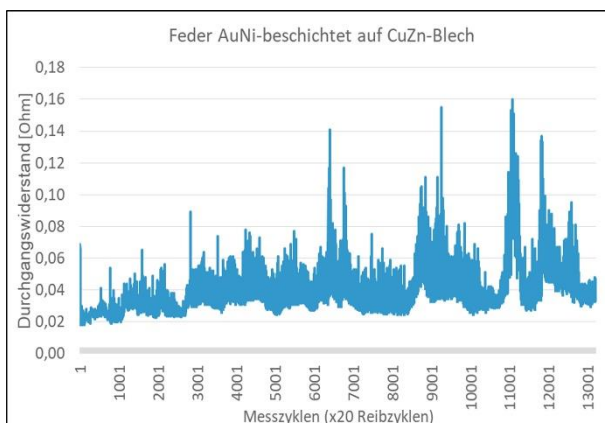


Abbildung 41: Feder mit Au auf Messing

Ein klarer Beginn eines Verschleißprozesses zeigte sich nicht. Vielmehr traten in Abständen von 1.000 bis 3.000 Messzyklen Spitzen auf, die gegen Ende ausgeprägter und häufiger wurden. Insgesamt blieb der Widerstand aber klein. Bis etwa 1.000 Zyklen blieb der Widerstand bei kleiner Streuung unter 0,03 Ohm, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass erst im weiteren Verlauf die Zerrüttung der Kontaktstelle begann.

An der Reibstelle trat erwartungsgemäß Au-Abrieb auf, der sich um die Kontaktstelle anlagerte. Dies wird, auch bei schon beschädigter Au-Schicht, den guten Kontakt aufrechterhalten und durch gelegentliche „Selbstreinigung“ zu den Spitzen geführt haben. In Abbildung 42 links sind die Reibstelle nach Versuchsende und der Abrieb gut zu erkennen.



Abbildung 42: Links: Reibstelle und Abrieb an Au auf CuZn. Rechts: Vergrößerung, Abrieb entfernt

Die Vergrößerung in Abbildung 42 rechts zeigt jedoch, dass die Hartgoldschicht durchgerieben ist und der Kontakt längst versagt hat.

Ein Federkontakt mit Goldpunkt wurde mit 500.000 Reibzyklen belastet (25.000 Messzyklen). Nach 5.000 Messzyklen (100.000 Reibzyklen) erfolgte eine erste optische Begutachtung. Bei der Feder mit Goldpunkt fand die Stromleitung im Edelstahl statt. Daher war der Mittelwert aus den ersten 1.000 Messwerten mit 0,138 Ohm erwartungsgemäß höher als bei der allseitig vergoldeten Referenzfeder. Das Gold trägt wesentlich zur Stromleitung und damit zur Widerstandsreduzierung bei. Zerrüttungseffekte zeigen sich in Abbildung 43 ab ca. 1.000 Messzyklen, sie werden im Verlauf der Messung immer deutlicher.

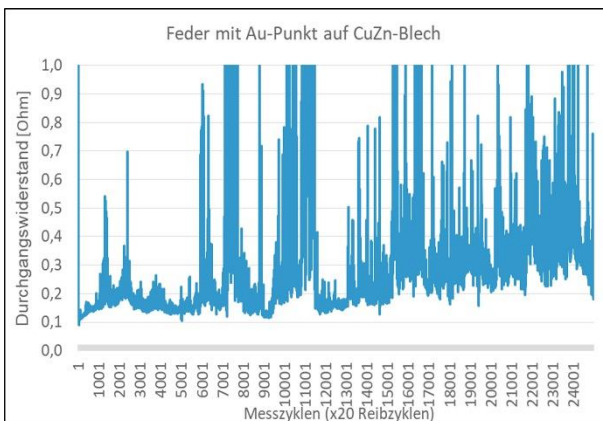


Abbildung 43: Feder mit Goldpunkt auf CuZn

Die Abbildung 44 links zeigt die, hier gut ausgerichtete, Kontaktstelle mit den Reibspuren. Nach 100.000 Reibzyklen war noch viel Gold vorhanden. Selbst nach 500.000 Reibzyklen fand sich noch viel Gold auf der Feder (Abbildung 44 Mitte und rechts), obwohl die Kontaktstelle bereits versagt hatte. Dieses Versagen hatte seine Ursache also nicht in fehlendem Gold als Kontaktwerkstoff, sondern eher in der Deplatierung der Kontaktstelle. Mit einer zweiten Feder mit Au-Goldpunkt wurde der Versuch wiederholt. Der Mittelwert aus den ersten 1.000 Messung für R war dabei 0,131 Ohm, vergleichbar mit dem ersten Versuch.

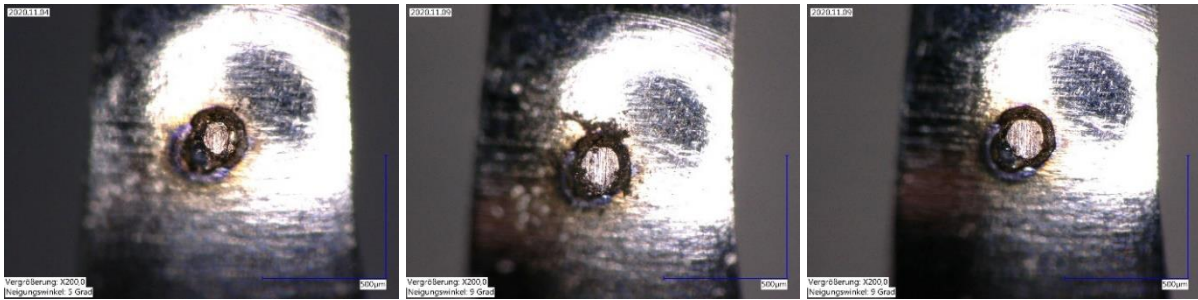


Abbildung 44: Au-Punkt. Links: 100.000 Zyklen. Mitte: 500.000 Zyklen mit Abrieb. Rechts: 500.000 Zyklen, gereinigt

Nach ca. 1.800 Messzyklen (36.000 Reibzyklen) traten die ersten Auffälligkeiten auf, wie sie auch schon beim ersten Versuch beobachtet werden konnten. Wie auch bei den Versuchen mit der Referenzfeder wird der Au-Abrieb zur Leitung beigetragen haben. Bei diesem Versuch versagte die Kontaktierung jedoch endgültig bei 3.000 Messzyklen und es stellte sich nach kurzer Spitze ein Widerstand von 2,4 Ohm ein. Das deutete auf die Kontaktierung Edelstahl auf Messing hin. Die Mikroskopbilder bestätigten die Kontaktierung auf dem Edelstahl der Feder (Abbildung 45). Neben dem deutlich abgeriebenen Goldpunkt zeigt auch die Stahlfeder Reibspuren, in Abbildung 45 rechts mit entferntem Abrieb gut zu sehen.

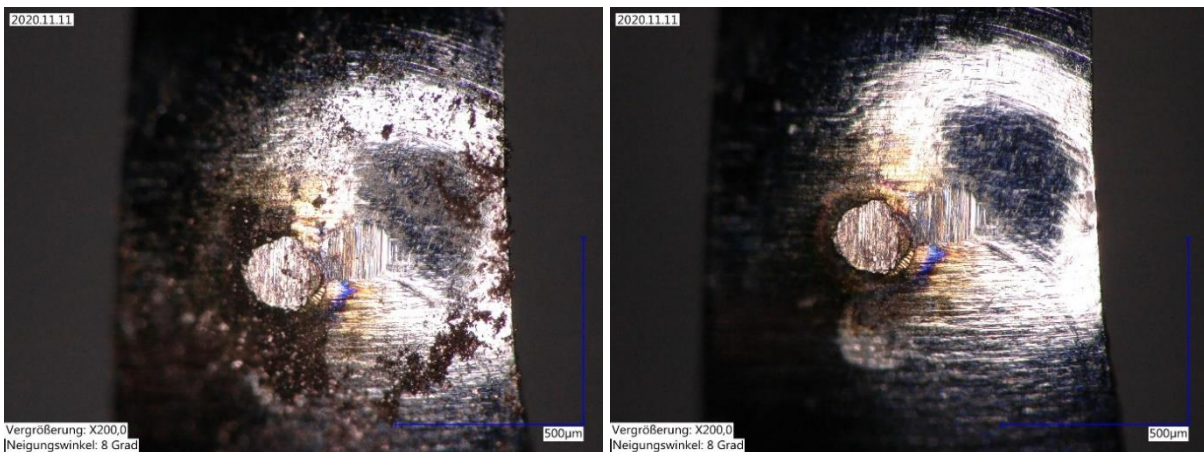


Abbildung 45: Links: Die 2. Feder nach 60.000 Reibzyklen. Rechts: Die 2. Feder gereinigt

6.6.1.3 Schlussfolgerungen

Durch die, im Vergleich mit galvanisch veredelter Feder, große Dicke (Höhe) des Au-Punktes bietet der aufgeschweißte Kontakt Potential für eine größere Lebensdauer. Durch den kleinen Durchmesser gibt es Einschränkungen bei der Robustheit gegenüber Fertigungs- bzw. Lagetoleranzen, die Ausrichtung im Kontaktsystem muss sehr genau sein. Diese könnten z.B. durch eine linienförmige Aufschweißung oder mehrere Au-Punkte kompensiert werden.

6.6.2 Zykluszeitbetrachtung

Die Zykluszeit wurde aus den Einzelkomponenten abgeleitet und jeweils separat ermittelt. Da gegenwärtig noch Optimierungspotenzial in der Scanner- und Laserprozesssteuerung besteht, bildet diese Komponente den größten Zeitanteil von ca. 865 ms. Dieser hohe Zeitanteil ist hauptsächlich den Kommunikationszeiten zuzuschreiben. Die Gesamtzykluszeit ist dem Diagramm aus Abbildung 46 zu entnehmen und beläuft sich auf ca. 2630 ms. Daraus ergibt

sich eine Beschichtungsfrequenz von 22,8 Teilen die Minute. Diese Leistungskennzahl entspricht aktuell nicht den angestrebten 600 Teilen pro Minute aus dem Antrag. Es besteht jedoch noch Optimierungspotenzial im Gesamtprozess. Durch den Einsatz leistungsstärkerer Hardware und geeigneter Laserkomponenten kann die Leistungskennzahl ebenfalls gesteigert werden. Aus Kosten- und Effizienzgründen konnte im Rahmen des Projekts und aufgrund des Austritts von Fa. F&K Delvotec keine entsprechende Hardware beschafft werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Zykluszeit besteht durch das in Reihe schalten mehrerer GreenCoating-Systeme.

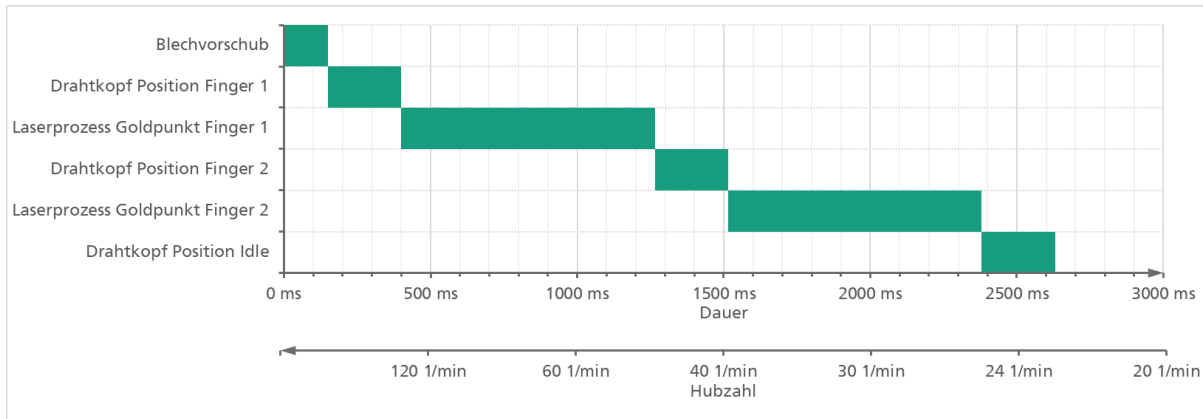


Abbildung 46: Zykluszeitermittlung

6.6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Neben den umwelttechnischen Verbesserungen durch den GreenCoating-Prozess gehen außerdem Einsparungen des Goldverbrauchs und damit eine Kostenreduktion einher. Aus den vorherigen Kapiteln lassen sich durchschnittliche geometrische Werte der Goldpunkte mit Durchmesser 229 μm und einer Höhe von 91,7 μm ermitteln. Diese dienen nun als Basis für die Betrachtung der Ressourceneffizienz. Abbildung 47 stellt das durchschnittlich benötigte Goldvolumen gemäß $V = \frac{\pi}{6}h(3R^2 + h^2) = \frac{\pi}{6}h\left(\frac{3}{4}D^2 + h^2\right)$ zusammen. Mit dem im GreenCoating-Verfahren angestrebten Prozess wird ein Volumen pro Punkt von $V_p = 2,29 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ aufgeschweißt. Bei einem Goldpreis von 1.628,36€ je Feinunze ergibt sich der volumetrische Goldpreis von 1,01 €/mm³. Im Folgenden werden die Einsparungen auf eine Fallstudie von einer Bauteilserie mit 5 Millionen gefertigten Kontaktbauteilen hochgerechnet.

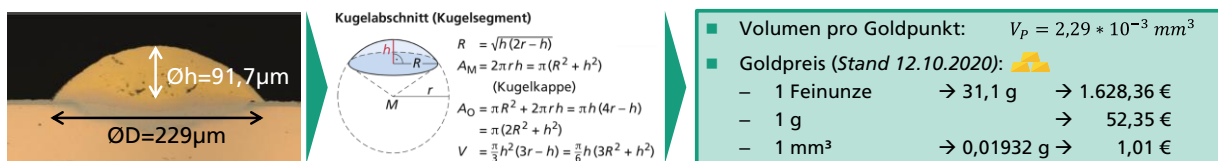


Abbildung 47: Berechnung des Goldpunktvolumens und der Goldkosten

Den nachfolgend ermittelten Werten stehen Netto-Systemkosten ohne Engineering in Höhe von ca. 180.000 € entgegen.

Als adäquaten Vergleich sind für die Beschichtung der Schleifinger die GreenCoating-Technologie und die Brushtechnik gegenüberzustellen. Durch die abstehenden Kontaktkuppen stellt die Brushtechnik normalerweise das geeignetste Verfahren dar und gilt für diesen Anwendungsfall als kostenoptimiert. Klassischerweise kommen etwas dickere verschleißresistentere Edelmetall-Schichtdicken zwischen 2,0 und 5,0 μm auf den Kuppen zum Einsatz (Abbildung 48). Konventionell belaufen sich die Goldkosten je Bauteil auf 1,212

Cent für 2 µm Schichtdicke und 3,051 Cent für die 5 µm Schichtdicke mit der herkömmlichen Brusstechnik. Im Vergleich dazu belaufen sich die goldkosten mit der GreenCoating-Technologie auf 0,46 Cent für ein Bauteil mit zwei Goldpunkten. Dies entspricht einer Kostenreduktion von ≈ 62,1 % bis zu 84,9 %. Hochgerechnet auf 5 Mio. gefertigte Bauteile entspricht das einer Einsparung an Gold im Wert von 37.600 € bis 129.550 €. Der Break-Even-Point wird bei den anfallenden Systemkosten demnach frühestens nach 6,95 Mio. beschichteten Bauteilen erreicht.

Die Schnappscheibe wird klassischerweise mit der Selektivtechnik beschichtet. Auf der Schnappscheibe werden dazu bislang drei 4 mm breite Streifen selektiv mittels Bandgalvanik abgeschieden, um sowohl den Kontakt für den Druckpunkt in der Mitte als auch die Kontaktstellen in den Ecken zu beschichten. Mit dem GreenCoating-Verfahren sind dafür 5 Goldpunkte geplant, vier in den Ecken und einer in der Mitte. Inovan beschichtet vergleichbare Bauteile mit einer Goldschichtdicke von 1,0 µm, vgl. Abbildung 48. Dabei ergab sich ein Goldvolumen mit dem konventionellen Beschichtungsverfahren von $240 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ und Goldkosten in Höhe von 24,24 Cent pro Bauteil. Im Vergleich dazu wird für dasselbe Bauteil mit der Laserbeschichtung lediglich ein Goldvolumen von $11,45 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ benötigt, was 1,156 Cent pro Bauteil entspricht. Daraus resultiert eine Einsparung pro Bauteil von 23,083 Cent und somit eine Kostenreduktion in Höhe von 95,2 %. Auf 5 Mio. Bauteile entspricht dies einer Einsparung von 1.154.150 €. Die Systemkosten amortisieren sich bereits nach 779.897 beschichteten Bauteilen.

Ein besonderes Einsparpotential kann demnach bei großen, flächigen Bauteilen mit verteilten Kontaktstellen und unterschiedlichen Oberflächenkrümmungen nachgewiesen werden.

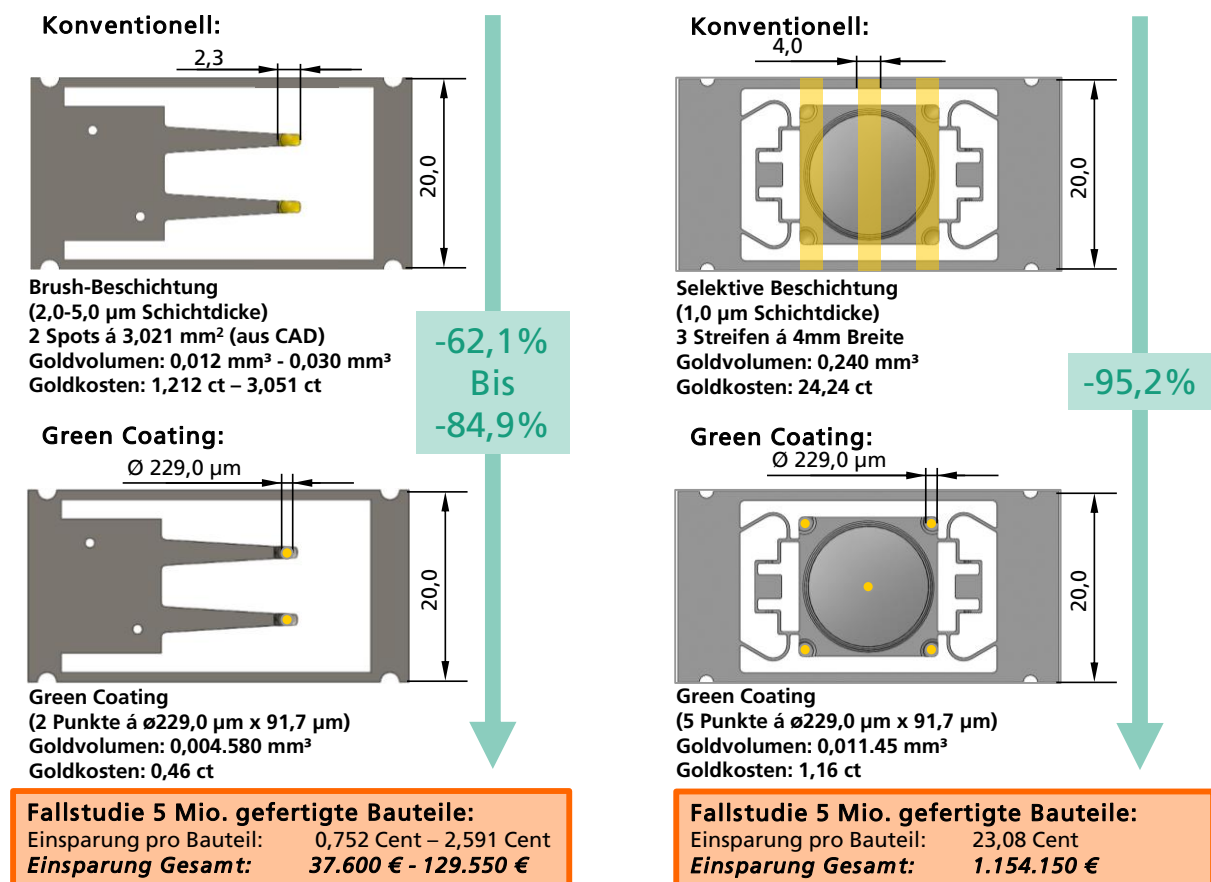


Abbildung 48: Bewertung der Ressourceneffizienz beider Demonstratorbauteile im GreenCoating-Verfahren. Links: Schleifkontakt. Rechts: Schnappscheibe.

Für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde dabei in erster Linie lediglich die Reduktion des Goldverbrauchs und eine damit einhergehende Reduktion der Materialkosten herangezogen. Weitere Kosten, die für Logistikkäufe zwischen Stanzerei und Galvanik, für den Galvanikprozess selbst sowie für eingesetzte Chemikalien, die Entsorgung und Aufbereitung der chemischen Abfälle, Energiekosten und der Aufwand zum Schutz der Mitarbeiter und der Umwelt vor den Giftstoffen, wurden dabei nicht mitberücksichtigt. Ebenfalls außerhalb der Betrachtung liegen Faktoren wie die ständige Verfügbarkeit durch Prozessintegration und die Unabhängigkeit von Lieferantenpreisen (Galvanik) durch In-Haus Goldbeschichtung. Stanzabfälle, welche mit Gold beschichtet sind und aufwändig recycelt werden müssen, fallen ebenfalls nicht mehr an.

6.6.4 Verwertungsstrategie

Die Verwertungsstrategie stellt sich aus mehreren Kanälen zusammen und legt den Fokus einerseits auf die Forschungsseite und andererseits auf die Industrieseite. Das Verwertungskonzept für die Forschung ist in Abbildung 49 detailliert erläutert.



Abbildung 49: Verwertungsstrategie in der Forschung

Auf der industriellen Seite werden die Einzelsysteme und damit die Technologie über die Projektlaufzeit hinaus durch die beteiligten Unternehmen optimiert und zur Marktreife weiterentwickelt. Diese werden zeitnah nach Projektabschluss in ein verkaufsfähiges Teilsystem überführt, das am Markt angeboten werden kann. Im Anschluss arbeiten alle Partner an der GreenCoating-Technologie weiter, sodass dieses bis zur Serienreife optimiert und das galvanische Beschichten Schritt für Schritt für geeignete Bauteile substituiert wird. Zur Verbreitung der Technologie werden durch das Fraunhofer IPT als beteiligte Forschungseinrichtung Artikel in Fachzeitschriften publiziert und somit eine wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse in Veröffentlichungen sichergestellt. Bei Möglichkeit wird die Technologie durch das Konsortium auf branchenspezifischen Messen wie z.B. der Blechexpo und Stanztec vorgestellt und somit einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. Die beteiligten Unternehmen werden die Technologie durch bestehende Kontakte in verschiedene Abnehmerbranchen am Markt bekannt machen und die Verbreitung der

Technologie als Multiplikatoren vorantreiben. Die Unternehmen profitieren auf unterschiedliche Art von den Projektergebnissen: Zunächst ergibt sich ein Erkenntnisgewinn aus der Entwicklung der Einzelsysteme, der intern in die Entwicklung neuer Produkte einfließen kann. Darüber hinaus können die Unternehmen ihre Position durch den Vertrieb des Beschichtungsmoduls stärken. Die Einzelsysteme werden in diesem Fall von den Unternehmen zugeliefert, wodurch neue Märkte erschlossen werden können.

Mit Hilfe der Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden bei Harms & Wende QST GmbH erarbeiteten Lösungen zu einem Gesamtprodukt zusammengeführt, so dass ein marktfähiges Produkt entsteht. Das Produkt besteht dabei im Wesentlichen nicht nur aus den eingesetzten Komponenten der Bildverarbeitung, sondern aus dem Ingenieur Know-how und den eingesetzten Algorithmen. Dafür wurde im Projekt Wissen erarbeitet, welches auf zukünftige Projekte anwendbar ist. Hauptkunden für das geplante Produkt zur Optischen Inspektion sind Maschinen - und Anlagenbauer. Da die Harms & Wende QST GmbH über das sonstige Produktspektrum im Bereich Widerstandsschweißen Zugang zu den relevanten industriellen Endanwendern hat. Das betrifft die Produzenten klassischer Stahlbauteile, aber auch vor allem auch die Produzenten von elektrischen und elektronischen Bauteilen aus den verschiedensten leitenden Werkstoffen. Auch im Rahmen des Ausbaus der Elektromobilität gibt es hier neue Produktionsprozesse mit den entsprechenden Anforderungen an die Qualitätssicherung. Bei diesen Kunden sehen wir sehr gute Chancen, über technologische Beratung hinaus Absatz zu generieren. Bei diesen Anwendern liegt bei ca. 35-45% ein Marktpotenzial für optische Überwachungskonzepte vor. Inovan als Endanwender profitiert unmittelbar durch die Anwendung der Technologie. Harms & Wende und Lunovu können das System bzw. die Technologie in ihr Produktportfolio aufnehmen und das GreenCoating-Verfahren über die Abnehmer ihrer Produkte am Markt etablieren.

Anhängig von den situationsbedingten Corona-Einschränkungen soll ca. 6-9 Monate nach Projektbeendigung ein Verwertungsworkshop mit den Projektpartnern durchgeführt werden, indem sämtliche nachgelagerten Arbeiten reflektiert und weitere Schritte diskutiert werden. Ziel aller Beteiligten ist die erfolgreiche Umsetzung und Implementierung in Industrieprozessen.

7 Fazit

Das GreenCoating-System konnte trotz eines Partnerwechsels erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Aus der Entwicklung der Einzelkomponenten kann für die weiteren Projektarbeiten im Themengebiet der alternativen Beschichtung zur Substitution der Galvanik das System- und Prozesswissen abgeleitet und zur Optimierung der Technologie angewandt werden. Insbesondere im Bereich des Handlings von Mikrodrähten konnten wesentliche Fortschritte erzielt werden. Hinsichtlich der Laserprozesssteuerung und der bildverarbeitenden Erkennung des Drahts besteht einerseits noch prozesstechnisches Optimierungspotenzial, als auch eine grundlegende Beschleunigung der Einzelabläufe zur Reduzierung der Zykluszeit und einer damit einhergehenden Befähigung zur Industrietauglichkeit. Die optische Inspektion konnte während der Projektarbeiten bereits auf eine deutlich höhere Ausbringungsrate ausgelegt und erforscht werden. Es zeigte sich, dass eine detailliert ausgelegte Beleuchtung elementar für die Gesamtperformance des QS-Moduls ist. Besonders hervorzuheben sind die Umweltrelevanz und die gesteigerte Ressourceneffizienz durch das laserbasierte Mikroauftragschweißen von Golddrähten. Die Goldbeschichtung kann nunmehr in einem lokal stark abgegrenzten Sektor stattfinden, wobei lediglich der Bereich mit auftretendem elektrischen Kontakt beschichtet werden kann. Ebenfalls sind bei verschleißbehafteten Bauteilen wie dem Schleifkontakt die geometrischen Beschichtungsbedingungen mit einer kuppenförmigen Goldbeschichtung vorteilhafter im Vergleich zu einer dünnen flächigen Schicht. Das nachgewiesene Einsparpotenzial an Edelmetall von bis zu 95 % stellt sowohl hinsichtlich der Ressourcen- und Kosteneffizienz, als auch der Umweltrelevanz der Technologie eine Motivation für eine den Projektzeitraum überschreitende Weiterführung der Arbeiten dar. Allerdings sind die Systemkosten bezogen auf die Systemleistung aktuell im Vergleich zum Goldkostenvorteil nicht überwiegend. Daher arbeiten alle Partner an der Weiterentwicklung ihrer Einzelsysteme und an der Optimierung der Ausbringung bzw. Zykluszeit. Ein Workshop außerhalb der Projektlaufzeit sichert die gemeinsame Weiterführung der Technologie und bündelt alle Inhalte mit dem Ziel einer erfolgreichen Überführung der Technologie in die Industrie.

8 Literaturverzeichnis

- [1] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., Fachverband Electronic Components and Systems: Steckverbinder – Technologien und Trends. Frankfurt, Juni 2015, www.zvei.org
- [2] Hoppe, T.: Die tribologischen Eigenschaften von vergoldeten elektrischen Kontakten. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KIT Scientific Publishing, 2013
- [3] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Effiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie. Schoder Druck GmbH Co. KG, Gersthofen, 2003
- [4] Schlesinger, M., Paunovic, M.: Modern Electroplating. Fifth Edition, Copyright 2010 John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Belting, M.: Abschlussbericht Mifulas2: Selektive Funktionalisierung von Oberflächen durch generative Mikro-Lasermaterialbearbeitung
- [6] Satoshi Suzuki and others: Topological structural analysis of digitized binary images by border following. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, pages 32–46, 1985.
- [7] George Green: An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism, 1828.