

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt - gefördert unter dem
Az: 39981/01-21/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Entwicklung eines ozonbasierten Beizverfahrens mit hoher Energieeffizienz und
geringem ökologischen Fußabdruck bei niedrigen Prozesskosten für die
Kunststoffbeschichtung für Haushaltswaren

Förderbeginn: 11.12.2024

Förderende: 10.12.2025

Aktenzeichen: 39981/01-21/2

Zuwendungsempfänger:

DELTA Engineering & Chemistry GmbH
Rohrdamm 88
13629 Berlin

Geschäftsführer: Frau Dr. Sarah Schmitz

Projektleiter R&D: Frau Dr. Sarah Schmitz

Berlin, 17.02.2026

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern und Tabellen	3
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	3
Zusammenfassung	4
Einleitung und Projektmotivation	6
Hauptteil	9
Fazit und Ausblick	24
Literaturverzeichnis	24
Anhänge	Error! Bookmark not defined.

Verzeichnis von Bildern

- Abbildung 1:** Foto des Beizaufbaus im Technischen Berufskolleg Solingen.
- Abbildung 2:** Versuche zur Bestimmung der Haftfestigkeit an ABS-Bauteilen.
- Abbildung 3:** Vergleich der Strömungseigenschaften vor und nach Änderung der Einströmung.
- Abbildung 4:** Anlagenschema des Pilotkunden und Schema der Badauslegung mit Ozongenerator und Umwälztechnik.

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol (Kunststoff)
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
Cr(III)	Chrom(III), dreiwertige Chromverbindungen
Cr(VI)	Chrom(VI), sechswertige Chromverbindungen
CrO ₃	Chromtrioxid, Chromsäure
ECHA	European Chemicals Agency (Europäische Chemikalienagentur)
EHS	Environment, Health and Safety (Umwelt, Gesundheit und Sicherheit)
EN	Electroless Nickel (chemisch Nickel)
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
MBS	Methacrylat-Butadien-Styrol (Kunststoff)
MS	Meilenstein
O ₃	Ozon
OEM	Original Equipment Manufacturer
PC	Polycarbonat (Kunststoff)
PFA	Perfluoralkoxy (Kunststoff)
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
POP	Plating-on-Plastics (Kunststoffmetallisierung)
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)
PVDF	Polyvinylidenfluorid (Kunststoff)
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (EU-Chemikalienverordnung)
REM	Rasterelektronenmikroskop
SVHC	Substance of Very High Concern (besonders besorgnis-erregender Stoff)
TBK	Technisches Berufskolleg Solingen

Zusammenfassung

Gegenstand des Projekts war die Überführung einer ozonbasierten, Cr(VI)-freien Beiztechnologie für Kunststoffe in einen technisch relevanten Demonstrationsmaßstab mit 200 l Badvolumen am Technischen Berufskolleg (TBK) Solingen. Ausgangspunkt waren vorliegende Ergebnisse, die zeigten, dass ABS-Kunststoffteile nach dem Beizen in einem ozonhaltigen wässrigen Medium grundsätzlich beschichtbar sind und die gängigen Anforderungen der Industrie an das optische Erscheinungsbild und die mechanische Haftfestigkeit der abgeschiedenen Metallschicht grundlegend erfüllen. Alle Prozessschritte sind zeitlich in die Taktung automatischer Beschichtungsanlagen integrierbar, wodurch die Technologie kompatibel mit industriellen Produktionsbedingungen ist. Als limitierender Faktor im Labormaßstab wurde die inhomogene Verteilung von gelöstem Ozon im Beizmedium identifiziert. Diese Inhomogenität führt zu Unstimmigkeiten in der Beschichtungsqualität und schränkt die Reproduzierbarkeit, insbesondere bei geometrisch anspruchsvollen Bauteilen sowie bei Mehrkomponententeilen stark ein. Um ein belastbares Prozessfenster und reproduzierbare Metallisierungsbedingungen zu erreichen, wurde im Projekt eine Technikumsanlage aufgebaut, in Betrieb genommen und über mehrere Monate stabil betrieben. Parallel dazu wurden die zugehörigen Prozessschritte der Kunststoffmetallisierung (Reinigung, Beizen/Ätzen, Aktivierung sowie Metallabscheidung bis hin zur finalen Verchromung) am TBK eingeführt. Zusätzlich wurde ein standortspezifisches EHS-Konzept für den sicheren Betrieb der Ozonanlage implementiert, inklusive Abluftführung, Raumluftdetektion und automatisierter Sicherheitsfunktionen.

Im Projektverlauf wurden die Arbeitspakete AP1 bis AP4 planmäßig bearbeitet. Mit Abschluss der Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage wurde Meilenstein MS1 erreicht. In der anschließenden Phase der Prozessentwicklung (AP3) wurden Anlagenkomponenten getestet, iterativ angepasst und im Hinblick auf Prozessstabilität, Ozonverteilung und Qualitätssicherung entwickelt. Zudem wurde das Zusammenspiel zwischen Ozongenerator, galvanoechemischer Umgebung und Prozessparametern systematisch untersucht. Durch konstruktives Redesign der Einspeisung und die Implementierung einer automatisierten Ozonregelung wurden positionsabhängige Inhomogenitäten signifikant reduziert und reproduzierbare Beizbedingungen geschaffen. Unter optimierten Bedingungen wurden verschiedenste Bauteile erfolgreich metallisiert und verchromt. Als Leistungsindikator werden Haftfestigkeiten oberhalb der industriellen Zielvorgabe von 7 N/cm erreicht. Die Validierung der Zielparame-ter und der Vergleich zu marktüblichen Alternativverfahren führten zur Erreichung von Meilenstein MS2. Die Umweltrelevanz und Innovationshöhe der Technologie liegen insbesondere in der Cr(VI)-Freiheit als Substitution der konventionellen Chromschwefelsäurebeize, einem reduzierten Bedarf an klassischen Chemikalien (z. B. Säuren) sowie der PFAS-Freiheit des Beizverfahrens als strategischer Vorteil im Kontext möglicher regulatorischer Einschränkungen. Die Ozonführung folgt dem Prinzip der Kreislaufwirtschaft: Sauerstoff wird im Generator zu Ozon umgewandelt, im Prozess verbraucht und in der Abluftbehandlung wieder zu Sauerstoff zersetzt, sodass die Abluftgrenzwerte sicher eingehalten werden. Abschließend wurde eine skalierfähige Gesamtkonzeption für die Überführung in eine großtechnische Anwendung mit 1.400 l Tankvolumen erstellt, die Layout, Schnittstellen, Sicherheits- und Genehmigungsaspekte als Grundlage für Detailengineering abdeckt, womit Meilenstein MS4 adressiert wurde. Aufbauend auf, bzw. angelehnt an der in diesem Projekt entwickelten Konzeption wird auch die Entwicklung der Anlage erfolgen, die im darauffolgenden Projekt zur Förderung bei der DBU beantragt wird.

Kunden aus der Sanitärindustrie haben großes Interesse an der Einführung des Verfahrens in eine Anlage zur automatischen Serienbeschichtung von ABS Bauteilen gezeigt. Dafür sind basierend auf den

bislang erreichten Ergebnissen noch weitere Schritte notwendig, die eine bessere Abstimmung der Verfahrenskemikalien betrifft.

Nicht nur Branchen-spezifisch trifft das Konzept auf grosses Interesse. Auf der BW-Konferenz Umwelttechnik wurde auch vom Auditorium grosser Zuspruch für Entwicklungen bekundet, die sich mit der Cr(VI)- und PFAS-Freiheit beschäftigen und einen zirkulären Grundgedanken hegen.

Einleitung und Projektmotivation

Galvanisierte Kunststoffe vereinen viele Vorteile von Kunststoffen und Metallen, wie das geringe Gewicht und die leichte Formgebung von Kunststoffen mit der Korrosionsbeständigkeit und Wertigkeit von Metallen. So haben sie in den vergangenen Jahrzehnten einen großen Anteil der Effizienzgewinne und Energieeinsparungen im Automobil- und Luftverkehr durch Leichtbau ermöglicht, insbesondere durch die Substitution von Metallteilen durch Kunststoffe. Die einzigartigen Eigenschaften dieser beiden Materialien zu kombinieren, eröffnet neue Designmöglichkeiten und Anwendungsbereiche. Die Beschichtung erfolgt nicht nur aus ästhetischen Gründen, sondern vielmehr wegen der unübertroffenen Oberflächenhärte und der Widerstandsfähigkeit der abgeschiedenen Metallschichten gegen mechanische und Umwelteinflüsse sowie der herausragenden optischen und haptischen Eigenschaften. Das Ergebnis sind wertvolle und langlebige Bauteile, die in allen Bereichen des täglichen Lebens zu finden sind, von Haushalts- über Sanitär- bis hin zu Automobilanwendungen.

Die POP-Industrie (Plating-on-Plastics) ist seit vielen Jahren etabliert und bedient einen weltweiten Markt. Die meisten Galvanikbetriebe in Europa haben sich darauf spezialisiert, dem OEM-Kunden das komplette Produkt von der Designphase über die Kunststoffformung bis hin zur Metallbeschichtung anzubieten und treiben die Innovation in Richtung funktionellerer Oberflächen voran. Zurzeit werden noch etwa 40% des POP-Marktes von europäischen Herstellern bedient, was sich jedoch in naher Zukunft ändern könnte.

Die derzeitigen Verfahren beruhen auf der Verwendung hochgiftiger, mutagener und krebserregender Chrom(VI)-Verbindungen, die als „besonders besorgniserregende Stoffe“ (SVHC) eingestuft wurden und deren Verwendung von der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) eingeschränkt wird. Die ECHA hat 2013 Chromtrioxid und Cr(VI)-haltige Stoffe aufgrund ihrer mutagenen und karzinogenen Eigenschaften in den Anhang XIV der REACH-Verordnung aufgenommen. Die Verwendung solcher Stoffe ist genehmigungspflichtig und von der Industrie werden Substitutionspläne gefordert. In der Konsequenz setzt dies die Galvanikindustrie in Europa unter enormen Druck. Insbesondere die Anbieter des Plating-on-Plastics-Verfahrens sind gefordert, ein neues und nachhaltiges Verfahren zu entwickeln. Infolgedessen könnte die gesamte Industrie mit geringen Einschränkungen in andere Regionen, insbesondere nach Asien oder Nordamerika verlagert werden, was zu einem Verlust von hochqualifizierten Arbeitsplätzen und Know-how in Europa führen würde, ohne dass die Umweltprobleme gelöst würden.

Der Beizprozess mit Chromsäure erfüllt mehrere kritische Funktionen: Durch gezielten oxidativen Angriff auf die Kunststoffoberfläche wird auf dem ABS-Polymer eine mikrostrukturierte Oberflächentopographie erschaffen, die eine mechanische Haftung der nachfolgenden Metallschichten begründet. Mangan ist für sein oxidatives Potenzial und seine Fähigkeit zur Spaltung von Doppelbindungen ähnlich wie Chrom(VI) bekannt und wurde daher am intensivsten als alternative Beizlösung für herkömmliche Systeme untersucht und wird von großen Chemikalienlieferanten angeboten (MacDermid Enthone, MKS Atotech, DuPont, etc.). In der Vergangenheit wurden auch andere Verfahren, z. B. mit gasförmigem Schwefeldioxid (Schlötter), bewertet, wobei der Nachteil der chargenweisen Prozessführung bestehen blieb.

Alle alternativen Verfahren, die derzeit erprobt werden, basieren gemeinhin auf Mangan, haben es aber aufgrund verschiedener gravierender Nachteile, insbesondere Mangel an Prozessstabilität, Selektivität, Produktivität und Nachhaltigkeit, bisher nicht in die Serienproduktion geschafft. Zudem steigen die Prozesskosten im Vergleich zur etablierten Cr(VI)-basierten Methode um einen Faktor 10-

15, was diesen Prozess im internationalen Wettbewerb komplett abhängt. Hohe Investitionskosten und Anpassungen in den bestehenden Anlagen sind notwendig, die die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zusätzlich belasten. Zusammenfassend sind die über Jahre entwickelten Alternativprozesse bisher nicht anwendbar und auch die OEM weigern sich, die erhöhten Kosten zu tragen.

Das übergeordnete Ziel des Projekts war die Entwicklung und Validierung einer ozonbasierten, Cr(VI)-freien Beiztechnologie für ABS-Kunststoffe als nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige Alternative zur konventionellen Chromschwefelsäurebeize. Die Technologie erfüllt die regulatorischen Anforderungen der REACH-Verordnung und schafft gleichzeitig die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für eine industrielle Implementierung.

Im Einzelnen wurden folgende Projektziele definiert:

1. Überführung in den Technikumsmaßstab: Die im Labormaßstab (ca. 7 l) validierte ozonbasierte Beiztechnologie sollte in einem technisch relevanten Demonstrationsmaßstab (200 l Badvolumen) umgesetzt werden, um die Übertragbarkeit auf industrielle Produktionsbedingungen nachzuweisen.

2. Beherrschung der Prozesshomogenität: Das im Labormaßstab identifizierte zentrale Scale-up-Risiko – die inhomogene Verteilung von gelöstem Ozon im Beizmedium mit negativen Auswirkungen auf Stofftransport, Oberflächenaktivierung und Beschichtungsqualität – sollte durch geeignete anlagentechnische Maßnahmen (Strömungsführung, Ozoneintrag, Umwälzung) beherrschbar gemacht und ein reproduzierbares Prozessfenster definiert werden.

3. Integration in die vollständige Prozesskette: Die ozonbasierte Beize sollte nicht isoliert betrachtet, sondern in die vollständige Plating-on-Plastics-Prozesskette integriert werden (Reinigung, Beizen/Ätzen, Aktivierung, chemisch Nickel, galvanische Schichtfolge bis zur finalen Verchromung), um die Wechselwirkungen mit vor- und nachgelagerten Prozessschritten zu verstehen und zu optimieren.

4. Sicherheit und Genehmigungsfähigkeit: Für den Betrieb mit Ozon als toxischem und stark oxidierendem Gas sollte ein standortspezifisches EHS-Konzept entwickelt und umgesetzt werden, das Abluftführung, Raumluftdetektion, automatisierte Sicherheitsfunktionen und Schulungsmaßnahmen umfasst. Die Dokumentation sollte bereits eine spätere Genehmigung nach BImSchV vorbereiten.

5. Validierung der Bauteilqualität: Unter optimierten Bedingungen sollten anwendungsnahe Kundenbauteile metallisiert und verchromt werden, wobei die Haftfestigkeit (Zielvorgabe ≥ 7 N/cm), optische Qualität, Fehlstellenfreiheit und Robustheit gegenüber Bauteilvarianz als zentrale Qualitätskriterien dienen.

6. Umweltrelevanz und Nachhaltigkeit: Die ökologischen Vorteile der Technologie sollten belastbar herausgearbeitet werden, insbesondere die Cr(VI)-Freiheit, der reduzierte Einsatz klassischer Chemikalien (z. B. Säuren), die PFAS-Freiheit des Beizverfahrens sowie die kontrollierbare Abluftführung mit Rückführung zu Sauerstoff im Sinne einer Kreislaufwirtschaft.

7. Skalierungskonzept für industrielle Anwendung: Auf Basis der im Technikumsmaßstab gewonnenen Erkenntnisse sollte eine skalierfähige Gesamtkonzeption für die Überführung in eine großtechnische Anwendung (1.400 l Tankvolumen) erstellt werden, die Layout, Schnittstellen, Sicherheits- und Genehmigungsaspekte sowie wesentliche Auslegungsparameter abdeckt und als Grundlage für Detailengineering und Kostenkalkulationen dient.

Mit der Erreichung dieser Ziele sollte ein belastbarer Nachweis erbracht werden, dass die ozonbasierte Beiztechnologie nicht nur eine ökologisch vorteilhafte, sondern auch eine technisch robuste und wirtschaftlich tragfähige Alternative zur konventionellen Chromschwefelsäurebeize darstellt und

damit einen entscheidenden Beitrag zur langfristigen Wettbewerbsfähigkeit und zum Erhalt der europäischen Galvanikindustrie leisten kann.

Zur Erreichung der definierten Projektziele wurde das Vorhaben in vier Arbeitspakete (AP1 bis AP4) gegliedert, die jeweils spezifische Teilaufgaben adressieren und über definierte Meilensteine miteinander verknüpft sind.

Im ersten Arbeitspaket stand die Schaffung einer belastbaren technischen und organisatorischen Basis im Vordergrund. Als Ergebnis von AP1 sollte eine funktionsfähige Anlagen- und Prozessbasis zur Verfügung stehen. Zentral ist die Integration in die bestehenden Abläufe des Technikums unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten und die Etablierung der für die POP-Linie notwendigen Prozessschritte.

Im Anschluss soll die Anlage in Arbeitspaket 2 in Betrieb genommen und als integriertes System im Technikum des TBK etabliert werden. Hierbei ist eine umfassende Sicherheitsbewertung und Einführung aller erforderlicher Sicherheitsmaßnahmen für den sicheren Betrieb notwendig.

Das dritte Arbeitspaket bildet den Kern des Projekts und umfasste sowohl technische Optimierungen der Anlage als auch chemisch-prozesstechnische Qualifizierungsschritte. So sollten die Anlagenkomponenten durch Variation der Prozessbedingungen getestet und Prozesse zur Erzeugung homogener und reproduzierbarer Beizbedingungen stabilisiert werden. Die Leistungsfähigkeit des Ozongenerators sollte unter Realbedingungen getestet und anwendungsoptimierte Betriebsparameter definiert werden, um daraus Ableitungen für das weitere Scale-up treffen zu können. Notwendige Anpassungen an der Verfahrenskemie und insbesondere der Vergleich verschiedener Prozessrouten (ionogen, kolloidal, Direktprozesse) und deren Einfluss auf Aktivatorichte, Haftfestigkeit und Prozessfenster sollten betrachtet werden, um ein möglichst weites Fenster an Kundenteilen abdecken zu können. Schließlich münden diese Ergebnisse in der Validierung der entwickelten Prozesse hinsichtlich definierter Zielparameter und Überführung in vollständige Prozessbeschreibungen

Im vierten Arbeitspaket sollten die Projektergebnisse in eine Gesamtkonzeption für eine großtechnische Anwendung überführt werden. Die Aufgaben umfassten die Erstellung eines Tanklayoutkonzepts für eine Pilotkundenanlage inklusive Auslegung von Ozoneinmischung und Badumwälzung zur Optimierung von Sättigung und Homogenisierung. Die frühzeitige Berücksichtigung behördlicher Vorgaben durch Vorgespräche mit zuständigen Stellen und Berücksichtigung von lokalen Anforderungen an Genehmigungsfähigkeit, Emissionsgrenzwerten und Arbeitssicherheit sollten in die Erstellung eines abgestimmten Anlagenkonzepts für die spätere Realisierung in der Kundenanlage münden.

Durch diese strukturierte Aufgabenstellung sollte sichergestellt werden, dass alle technischen, sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Aspekte systematisch bearbeitet und in eine praxistaugliche, skalierfähige Lösung überführt werden.

Hauptteil

Gegenstand des Projekts war die Überführung einer ozonbasierten, Cr(VI)-freien Beiztechnologie für Kunststoffe aus einem validierten Labormaßstab in einen technisch relevanten Demonstrationsmaßstab mit 200 l Badvolumen am Technischen Berufskolleg (TBK) Solingen. Ausgangspunkt waren vorliegende Laborergebnisse, die zeigten, dass ABS-Kunststoffteile nach Beizen in einem ozonhaltigen wässrigen Medium grundsätzlich beschichtbar sind und die gängigen Anforderungen der Industrie an das optische Erscheinungsbild erfüllen. Darüber hinaus wurde bereits vor Projektbeginn gezeigt, dass alle Prozessschritte zeitlich in die Taktung automatischer Beschichtungsanlagen integrierbar sind, wodurch die Technologie prinzipiell kompatibel mit industriellen Produktionsbedingungen ist.

Als limitierender Faktor im Labormaßstab wurde die inhomogene Verteilung von gelöstem Ozon im Beizmedium identifiziert, was maßgeblichen Einfluss auf Masse-Transport Phänomene und Gleichgewichtsreaktionen zwischen zu bearbeitendem Bauteil und der Beizlösung hat. Diese Inhomogenität führt zu Unstimmigkeiten in der Beschichtungsqualität und schränkt die Reproduzierbarkeit, insbesondere bei geometrisch anspruchsvollen Bauteilen sowie bei Mehrkomponententeilen stark ein. In einem kleinen Labor-setup lassen sich Strömungs- und Eintragsbedingungen nur eingeschränkt kontrollieren und auf großtechnische Bäder übertragen. Gleichzeitig führt die geringe Größe zu Rand- und Skaleneffekten, die sich in Schwankungen der Oberflächenaktivierung und folglich in unterschiedlichen Beschichtungsqualitäten äußern. Um ein belastbares Prozessfenster und reproduzierbare Metallisierungsbedingungen zu erreichen, wurde im Projekt eine Technikumsanlage aufgebaut, in Betrieb genommen und über mehrere Monate stabil betrieben. Parallel dazu wurden die zugehörigen Prozessschritte der Kunststoffmetallisierung (Reinigung, Beizen/Ätzen, Aktivierung sowie Metallabscheidung bis hin zur finalen Verchromung) am TBK eingeführt. Schließlich wurden die Beiz- und Beschichtungsbedingungen der Ozon-Beiztechnologie unter anwendungsnahen Rahmenbedingungen stabilisiert und ausgewählte Kundenbauteile qualifiziert.

Im Projektverlauf wurden die Arbeitspakete AP1 bis AP4 planmäßig bearbeitet. Mit Abschluss der Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage wurde Meilenstein MS1 erreicht. In der anschließenden Phase der Prozessentwicklung (AP3) wurden Anlagenkomponenten getestet, iterativ angepasst und im Hinblick auf Prozessstabilität, Ozonverteilung und Qualitätssicherung weiterentwickelt. Zudem wurde das Zusammenspiel zwischen Ozongenerator, galvanochemischer Umgebung und Prozessparametern systematisch untersucht. Die Validierung der Zielparameter und der Vergleich zu marktüblichen Alternativverfahren führten zur Erreichung von Meilenstein MS2. Abschließend wurde eine skalierfähige Gesamtkonzeption für die Überführung in eine großtechnische Anwendung mit 1.400 l Tankvolumen erstellt, womit Meilenstein MS4 adressiert wurde.

Arbeitspakete und Meilensteine

Das Projekt wurde in vier Arbeitspakete gegliedert:

- AP1:** Einführung/Konstruktion der Anlagenkomponenten unter Sicherheitsaspekten sowie Badansätze im TBK
- AP2:** Inbetriebnahme und Etablierung der Kunststoff-Metallisierungsprozessschritte für ein Referenzsystem im TBK, Meilenstein MS1

AP3: Prozessentwicklung und Qualifizierung, Meilenstein MS2

AP4: Gesamtkonzeption für die Überführung in eine 1.400 l-Anwendung, Meilenstein MS3

Die Meilensteine dienten als entscheidende Haltepunkte: MS1 als Nachweis der erfolgreichen Inbetriebnahme, MS2 als Nachweis der erreichten Zielparame-ter und MS3 als Freigabe einer skalierfähigen Großanlagenkonzeption.

AP1 Einführung / Konstruktion der Anlagenkomponenten unter Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Aspekte. Badansätze im TBK

Vor Projektbeginn konnte bereits dargelegt werden, dass gelöstes Ozon eine sehr attraktive Alternative zu etablierten Beizverfahren ist und die Übertragung in den Technikumsmaßstab als konsequenter nächster Entwicklungsschritt erforderlich ist. Aus Voruntersuchungen lagen bereits umfangreiche Erkenntnisse vor, die als Grundlage für die Definition der Scale-up-Strategie dienten. Die Umsetzung erfolgte im Technischen Berufskolleg (TBK). Im Mittelpunkt stand die Übertragung etablierter galvanotechnischer Parameter auf den ozonbasierten Beizprozess, wobei unterschiedliche Ozongeneratoren sowie die wesentlichen Prozessgrößen (u. a. Ozonkonzentration, Temperatur und Beizzeit) systematisch untersucht wurden. Parallel dazu wurden die für einen späteren Produktionsbetrieb relevante Engineering-Aspekte – insbesondere Anlagenkonzeption, Abluftführung und sicherheitsrelevante Randbedingungen – bereits frühzeitig berücksichtigt, um den Übergang in größere Maßstäbe nicht nur chemisch, sondern auch anlagentechnisch belastbar vorzubereiten. Diese äußeren Voraussetzungen für die Einführung der Beiztechnologie sind jeweils anlagenspezifisch zu betrachten müssen in enger Abstimmung mit dem Anlagenbauer und Betreiber erarbeitet werden.

Im ersten Arbeitspaket stand die Schaffung einer belastbaren technischen und organisatorischen Basis im Vordergrund. Die Besonderheit bei der Einführung der neuen Technologie in ein Technikumsumfeld liegt in der Schnittstelle zwischen chemischer Prozessführung, Anlagentechnik und Arbeitssicherheit. Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel und erfordert sowohl in der Erzeugung als auch in der Einbringung ins Medium, der Abluftbehandlung und der Überwachung besondere Maßnahmen. Gleichzeitig müssen galvanotechnische Prozessschritte so eingeführt werden, dass ein durchgängiger Prozessfluss vom Rohteil bis zur finalen Metalloberfläche möglich ist.

Um die Ozongenerierung für ein 200 l-Becken sicherzustellen, wurde der nächstgrößere Ozongenerator „Helio“ der Firma MKS beschafft und in das Technikumssetup integriert. Damit wurde die technische Voraussetzung geschaffen, die im Labor nachgewiesenen Prozessprinzipien unter anwendungsnäheren Bedingungen zu erproben und die Übertragbarkeit in Richtung Produktionsmaßstab systematisch vorzubereiten.

Bereits in der Planungsphase wurde berücksichtigt, dass Scale-up-Schritte nicht 1:1 erfolgen und insbesondere bei strömungs- und stofftransportlimitierten Systemen neue Effekte auftreten. Für den ozonbasierten Beizprozess bedeutete dies, dass Fragen der Homogenität der Ozonverteilung, der Temperaturkontrolle sowie der Positionierung und Bewegung der zu beschichtenden Teile eine zentrale Rolle spielen. Folglich mussten Anlagenkomponenten und Prozessführung von Beginn an gemeinsam betrachtet und durch Vergleichsmessungen sowie beobachtbare Qualitätskriterien verifiziert werden. Gerade hierin liegt zugleich ein Vorteil des Technikumsmaßstabs: Bei geeigneter Auslegung sind prozessrelevante Parameter über längere Zeiten stabiler einstellbar, Onlineanalytik ist einfacher integrierbar und die Reproduzierbarkeit lässt sich im Vergleich zum Laborbetrieb deutlich

steigern. Auf dieser Grundlage wurden im Projekt zunächst die wesentlichen konstruktiven und sicherheitstechnischen Erkenntnisse beim Aufbau des Technikumsgeräts erarbeitet und anschließend schrittweise in die Prozessentwicklung überführt.

Der Übergang vom Laboraufbau (ca. 7 l Badvolumen) in den Technikumsmaßstab (ca. 200 l Gesamtvolumen) stellt dabei nicht nur eine Vergrößerung des Behälters dar, sondern einen Wechsel in eine maßstabsrelevante Anlagenrealität. Die im Technikum gewonnenen Ergebnisse erlauben Rückschlüsse auf eine spätere Übertragung in den Produktionsmaßstab mit Behandlungsbecken im Bereich von etwa 2.000 bis 6.000 l. Neben der Einstellung der Prozessbedingungen sind für einen Produktionsbetrieb insbesondere die Stabilität der prozessrelevanten Parameter über die Zeit, die Verfügbarkeit einer belastbaren Onlineanalytik und die systematische Bearbeitung von Arbeitssicherheitsthemen entscheidend. Diese Aspekte wurden im Projekt für das neuartige Verfahren gezielt herausgearbeitet und in die Anlagen- und Prozessgestaltung integriert.

Das Anlagenkonzept ist wie folgt umgesetzt: Das wässrige Beizmedium wird aus dem Beiztank über eine Umwälzpumpe angesaugt und über ein Kontaktmodul gepumpt, in dem unter Druck das eingespeiste Ozongas in das Beizmedium eingetragen wird. Über einen Bypass kann die Ozonkonzentration online erfasst und als automatischer Regelparameter in der Prozessführung genutzt werden. Für die Erstellung des Beizbeckens, den Anschluss an erforderliche Medien sowie die Installation der notwendigen Sicherheitstechnik wurden qualifizierte Fachbetriebe eingebunden, um eine technisch saubere und regelkonforme Umsetzung sicherzustellen.

Die Anlage besteht – wie in Abb. 1 erkenntlich – aus den Einzelkomponenten 1) Beizbecken mit Warenträgerbefestigung und Heizregister, 2) Umwälzpumpe, 3) Kontaktmodul, 4) Ozongenerator mit Steuerungs- und Sicherheitstechnik sowie 5) Ozonanalysator zur Onlineanalyse, die im Folgenden erläutert werden.

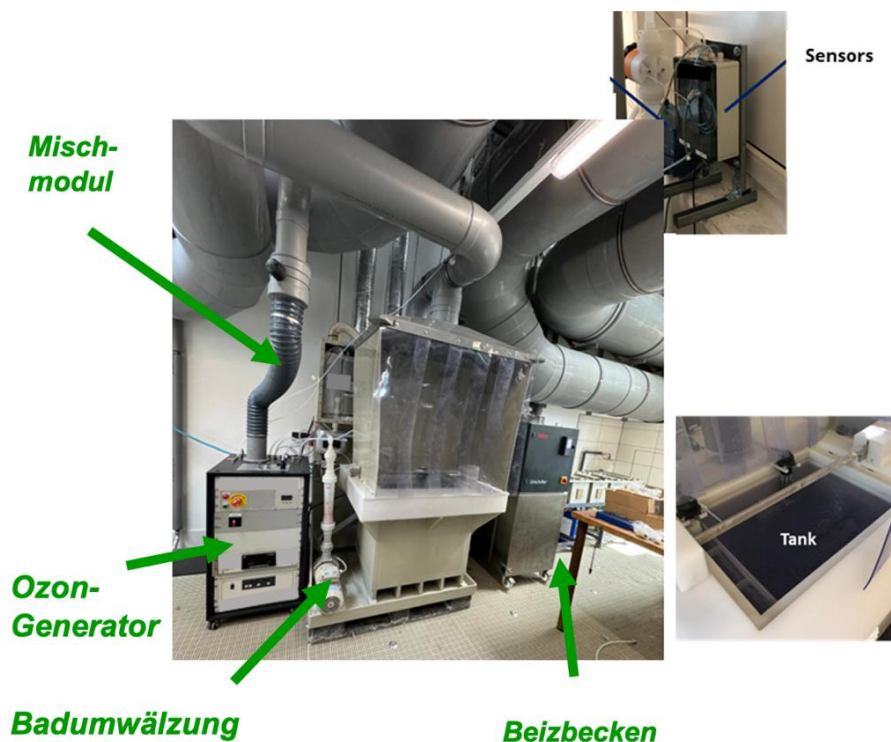


Abb. 1: Foto des Beizaufbaus im Technischen Berufskolleg Solingen.

Bei der Werkstoffauswahl war die Ozonbeständigkeit der medienberührenden Komponenten ein zentrales Kriterium, da Ozon aufgrund seines hohen Oxidationspotentials viele Kunststoffe bei längerem Kontakt angreift. Entsprechend wurden geeignete Materialien wie PVDF, PFA oder PTFE für medienberührende Bauteile vorgesehen. Das Beizbecken wurde aus Polypropylen gefertigt und mit einem PVDF-Inliner ausgestattet; das Gesamtvolumen beträgt ca. 200 l. Zur Prozessführung und zum Schutz der Anlagentechnik wurde das Becken zusätzlich mit einem Teflon-ummantelten Heizregister sowie einer Niveauüberwachung ausgerüstet. Sinkt der Flüssigkeitsstand durch Verdunstung oder andere Einflüsse zu stark ab, wird die Pumpe automatisch abgeschaltet, um Trockenlauf zu verhindern.

Parallel wurden die erforderlichen Chemikalien für das Plating-on-Plastics-Verfahren bereitgestellt, getestet und an die Rahmenbedingungen des TBK angepasst. In dieser Phase wurden Standardroutinen etabliert, die später als Grundlage für reproduzierbare Versuche und Bemusterungen dienen. Dazu zählen unter anderem definierte Vorgehensweisen zur Badansatzherstellung, zur Badpflege, zur Probenlogistik, zur Prozessdokumentation sowie zur Probenkennzeichnung und Rückverfolgbarkeit. Der Aufbau dieser Routinen ist erfahrungsgemäß entscheidend, da in der späteren Prozessentwicklung sonst schwer zu unterscheiden ist, ob Qualitätsschwankungen prozessbedingt oder organisatorisch/handhabungsbedingt verursacht werden.

Als Ergebnis von AP1 stand eine funktionsfähige Anlagen- und Prozessbasis zur Verfügung, die die Durchführung der Inbetriebnahme (AP2) ermöglicht und die späteren Entwicklungsarbeiten (AP3) methodisch absichert.

AP2 Inbetriebnahme der Anlage und Einführung sowie Etablierung der Kunststoff-Metallisierungsprozessschritte für das Referenzsystem im TBK; Meilenstein MS1

Im zweiten Arbeitspaket wurde die Anlage in Betrieb genommen und als integriertes System etabliert. Dabei ging es nicht nur darum, dass einzelne Komponenten funktionieren, sondern dass die Prozesskette unter realistischen Betriebsbedingungen stabil, sicher und reproduzierbar läuft. Zentral war die Einführung der StratOx-Technologie im 200 l-Maßstab und die Integration in die am TBK eingeführten galvanotechnischen Prozessschritte.

Ozon ist ein toxisches Gas, das auch in geringen Konzentrationen für Mensch und Umwelt gefährlich ist. Umso größer der Versuchsaufbau und das Wirkbadvolumen, desto umfangreicher müssen Sicherheitsmaßnahmen umgesetzt werden, um den sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Ein wesentlicher Teil von AP2 war die standortspezifische Sicherheitsbewertung der Produktionsumgebung. Auf dieser Grundlage wurde ein EHS-Konzept (Environment, Health and Safety) umgesetzt, das die besonderen Anforderungen von Ozonbetrieb, Abgasführung, potenziellen Emissionen und Notfallszenarien berücksichtigt. Unter Berücksichtigung aller gesetzlichen Vorgaben und des Stands der Technik wurde daher eine ausführliche Sicherheitsbetrachtung durchgeführt und alle relevanten Gefährdungen bewertet. In der Folge wurden gemeinsam mit der Arbeitssicherheitsfachkraft des TBK technische und organisatorische Maßnahmen definiert und alle Mitarbeiter entsprechend geschult. Hierbei wurde auch ein mögliches weiteres Scale-up in den Produktionsbetrieb, der häufig als Störfallbetrieb eingeordnet ist, berücksichtigt und die Dokumentation für eine spätere Genehmigung nach BImSchV vorbereitet. Zur analytischen Überwachung wurden Detektoren installiert, die die Ozonkonzentration in der Raumluft überwachen und bei Überschreitung definierter Schwellenwerte ein Warnsignal ausgeben sowie die Anlage automatisiert in einen sicheren Betrieb herunterfahren. Dadurch werden die vorgeschriebenen und empfohlenen Sicherheitsmaßnahmen umgesetzt.

Nach Abschluss der Installationen und der Umsetzung der Sicherheitsmaßnahmen wurde die Anlage in einen kontinuierlichen Betrieb überführt. Diese Phase diente der Stabilisierung und dazu, frühe Störeinflüsse zu identifizieren, beispielsweise durch anfängliche Badalterung, Einschwingeffekte in der Regelung oder Wechselwirkungen zwischen ozonbasiertem Beizprozess und nachgelagerten Prozessschritten. Der kontinuierliche Betrieb ist im Kontext der Prozessentwicklung wichtig, weil viele relevante Effekte – etwa Anreicherung von Nebenprodukten, Veränderung der Oberflächenchemie durch Badpflege oder die Robustheit gegenüber Bauteilvarianz – erst bei längerer Laufzeit sichtbar werden.

Nach Umsetzung der konstruktiven Anpassungen und der sicherheitstechnischen Maßnahmen und der Inbetriebnahme war der Nachweis erbracht, dass die Demonstrationsanlage im 200 l-Maßstab am TBK vollständig funktionsfähig ist und unter den definierten Sicherheitsbedingungen betrieben werden kann. Wesentlich war, dass die Anlage nicht nur als „Beizbad“ betrachtet wurde, sondern als Teil einer Prozesskette, die Reinigungs-, Aktivierungs- und Abscheideschritte umfasst.

Für die weitere Prozessentwicklung wurde eine strukturierte Versuchsmethodik etabliert, die die kritischen Einflussgrößen in Form von Versuchsmatrizen abbildete und damit eine reproduzierbare Bewertung der Prozessfenster ermöglichte. Gleichzeitig wurde ein analytischer Bewertungsrahmen aufgebaut, der industrielle Standardanalytik mit produktnahen Qualitätsanforderungen verknüpft. Dazu gehörten beispielsweise REM-Analysen zur Bewertung des Beizangriffs sowie die Bestimmung der Palladiumeinbaurrate mittels ICP-OES, die den Brückenschlag zu den End-of-Line-Kennwerten Haftfestigkeit und visueller Beschichtungsqualität leisten sollten. Diese Korrelation war wesentlich, da eine rein chemisch-analytische Optimierung nur dann industrienahe ist, wenn sie zuverlässig mit den späteren Bauteilanforderungen (Optik, Fehlstellenfreiheit, Haftfestigkeit) zusammenhängt.

Ergänzend wurden gezielt Maßnahmen untersucht, die erfahrungsgemäß erst im Zusammenspiel der gesamten Prozesskette wirksam werden. Dazu zählte die Nachbildung vollständiger Prozessequenzen bis hin zur Verchromung einschließlich nachgeschalteter Temperaturprofilrampen, um zusätzliche Haftfestigkeitsreserven zu erschließen und potenzielle Schwachstellen in der Grenzfläche Kunststoff/Metall frühzeitig zu identifizieren. Begleitend wurden die chemischen Lösungen vor und nach dem Beizen bewertet, um Alterungseffekte, Nebenreaktionen und mögliche Kreuzkontaminationen zu erkennen. Darüber hinaus wurden praktische Störgrößen adressiert, die im Scale-up typischerweise an Bedeutung gewinnen: Insbesondere Gasblasen und Grenzschichtphänomene können in größeren Bädern und bei komplexen Bauteilgeometrien zu lokalen Unterbeizungen führen. Entsprechend wurden Verfahren zur Entfernung adsorbierter Gasblasen (u. a. Ultraschall, Vibration und mechanische Impulse) erprobt, um deren Einfluss auf die Beschichtungsqualität zu minimieren.

Im weiteren Verlauf wurden die Versuche zunächst auf die gleichmäßige Anbeizung von ABS fokussiert und die Metallisierbarkeit sowie die Haftfestigkeit anhand definierter Prüfungen (u. a. Schocktest und Temperaturwechseltest) an unterschiedlichen Kundenmustern bewertet. Verchromte ABS-Bauteile werden insbesondere in der Haushaltswaren- und Sanitärindustrie eingesetzt. Da die dortigen Anforderungen im Vergleich zur Automobilindustrie häufig weniger kritisch sind, wurde dieser Bereich bewusst als geeigneter Einstieg gewählt, um die Technologie unter realitätsnahen Bedingungen zu stabilisieren und schrittweise in Richtung Serienreife weiterzuentwickeln.

Für die Optimierung der Versuchsbedingungen hinsichtlich Haftfestigkeit und Metallisierbarkeit wurden verschiedene kundenspezifische Bauteile sowie Prozesschemikalien getestet. Dabei zeigten sich – wie in der industriellen Praxis typisch – Einflüsse, die in dieser Form im Vorfeld nicht vollständig vorhersehbar sind. Diese hängen unter anderem von Lieferant und Spritzgussvoraussetzungen, von

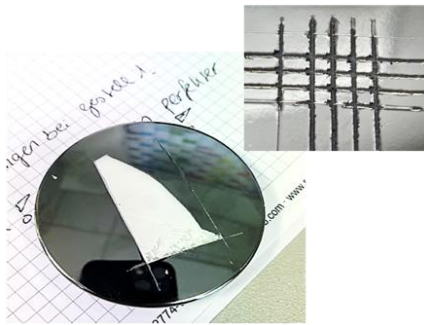
Bauteilgeometrie und von spezifischen Anforderungen an die Bauteilprüfung ab. Die Bauteiltypen, die im Rahmen der Arbeiten beschichtet wurden, waren entsprechend vielfältig (z. B. Duschkappen, Rasierköpfe, Wasserhahnkomponenten). Jedes Bauteil bringt Besonderheiten mit sich, die prozesstechnisch berücksichtigt werden müssen und deren Relevanz sich teilweise erst im Verlauf der Versuche vollständig erschließt. Insbesondere bei komplexen Bauteilen mit Ecken, Winkeln und Hinterschnitten muss die Anbeizung über alle Bereiche hinweg gleichmäßig erfolgen. Bei Wasserhahnkomponenten können beispielsweise MBS-basierte Inlays vorhanden sein, die selektiv unbeschichtet bleiben sollen, um spezifische Funktionen zu ermöglichen. Zusätzlich variieren Spritzgussqualitäten zwischen Lieferanten, was u. a. zu unterschiedlichen Oberflächenzuständen oder Verhärtungen im Kunststoff führen kann, und auch die Polymerqualität an sich kann schwanken.

Ebenso ist die nachgelagerte Beschichtungschemie komplex und übt einen großen Einfluss auf die Qualität der beschichteten Bauteile aus. Verschiedene Anbieter arbeiten mit unterschiedlichen Chemikalien und teilweise auch mit abweichenden Prozessführungen. In der Praxis existieren lange Prozessketten, Direktmetallisierungen und ionogene Verfahren, die sich sowohl in der eingesetzten Chemie als auch im Abscheidemechanismus unterscheiden. Diese Unterschiede waren im Projekt zu verstehen und zu evaluieren, um die Einsatzfähigkeit der ozonbasierten Beiztechnologie in unterschiedlichen Prozessrouten bewerten zu können.

Entsprechend zeigte sich, dass für qualitativ haftfeste Beschichtungen nicht nur die Beizbedingungen maßgeblich sind, sondern dass auch die vor- und nachgelagerten Prozessschritte einen signifikanten Einfluss haben. Nach dem Spritzguss werden Bauteile häufig nicht unmittelbar verchromt, sondern zwischengelagert oder zur Verwendungsstelle transportiert. Dabei können Kontaminationen der Oberfläche entstehen, die sich später in Form von Defekten oder Haftungsproblemen in der Beschichtung abbilden. Folglich ist ein Reinigungsschritt in einer klassischen Entfettung erforderlich, bevor die Metallisierung erfolgen kann. Nach dem Tauchen in die Beizlösung werden die Warenträger zunächst durch eine Kaskade von Spülbädern geführt, um anhaftende Beizlösung abzuspolen. Danach erfolgt ein Nachtauchprozess zur Entfernung von adsorbiertem Ozon, gefolgt von Aktivierung, Beschleunigung und chemisch Nickel. Durch diese als Vorbehandlung beschriebene Prozedur wird eine elektrisch leitfähige Oberfläche erzeugt, sodass über klassische galvanische Prozesse Kupfer-, Nickel- und Chromschichten abgeschieden werden können.

Je nach Wahl und Einstellung der Bedingungen können Bauteile entstehen, die offene Stellen an Kanten oder Hinterschnitten aufweisen oder eine stark variierende Haftfestigkeit der Metallschicht zeigen. Sind alle Parameter jedoch gut eingestellt, können Bauteile produziert werden, die in der Haftfestigkeit über den Vorgaben von 7 N/cm liegen (vgl. Abb. 2).

Kreuzschnitttest

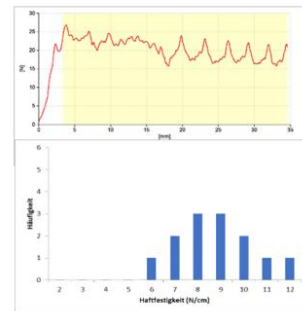


Weißabriss und Kreuzschnitttest bestätigen hohe Haftfestigkeit auf runden Objekten

Bestimmung des relativen Schälwiderstands



Abzugversuche belegen hohe Haftfestigkeit für ABS



Anforderungen Industrie:

ABS 7 N/cm

Abb. 2: Versuche zur Bestimmung der Haftfestigkeit an ABS-Bauteilen.

Zusammenfassend zeigt der erreichte Stand, dass die ozonbasierte Beiztechnologie im 200 l-Technikumsmaßstab mit stabiler Ozonregelung und einem belastbaren Sicherheitskonzept erfolgreich betrieben werden kann und dass unter optimierten Bedingungen Bauteilqualitäten erzielt werden, die eine weitere Skalierung und Automatisierung in einer Pilotanlage für definierte Prozessführungen rechtfertigen. Zugleich wurde deutlich, dass weitere Arbeiten erforderlich sind, um die Technologie über unterschiedliche Prozessrouten hinweg abzusichern und die Eignung verschiedener Prozesschemikalien bzw. Anbieter belastbar zu bewerten.

Der **Meilenstein MS1** wurde erreicht, nachdem alle sicherheitsrelevanten Installationen umgesetzt, die Anlage technisch abgenommen und der Betrieb über einen definierten Zeitraum stabil geführt wurde.

AP3 Prozessentwicklung; Meilenstein MS2

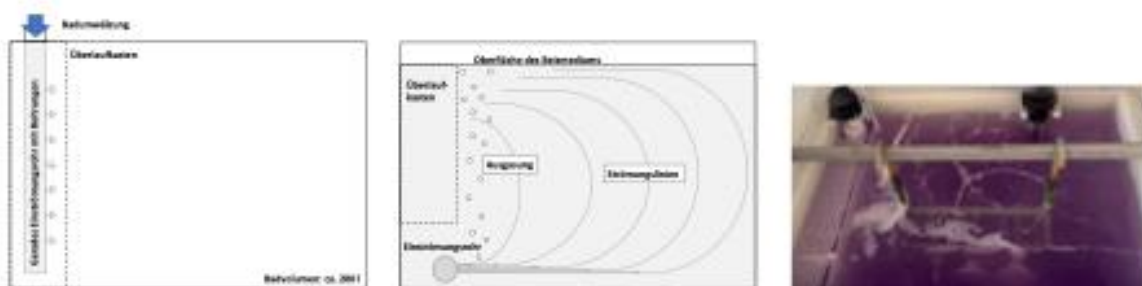
Die Prozessentwicklung bildete den Kern des Projekts und umfasste sowohl technische Optimierungen der Anlage als auch chemisch-prozesstechnische Qualifizierungsschritte. Das übergeordnete Ziel war die Schaffung robuster Prozessbedingungen, die den Marktanforderungen genügen, und die Bewertung der Technologie im Vergleich zu bestehenden Alternativverfahren. In diesem Schritt sollten Kundenbauteile beschichtet, nach gängigen Verfahren getestet und durch den Anwender qualifiziert werden. AP3 wurde in vier Teilbereiche gegliedert, die inhaltlich eng miteinander verzahnt waren.

AP3.1 Test der Anlagenkomponenten und Prozessstabilisierung durch Redesign der Anlagenkomponenten entsprechend der Testergebnisse

In AP3.1 wurde die Anlagenhardware hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung homogener und reproduzierbarer Beizbedingungen getestet. Der Maßstabssprung auf 200 l führt zu anderen Strömungsregimen, Grenzschichtdicken und Stofftransportbedingungen als im Labor. Daher wurde insbesondere die Ozoneinspeisung variiert, um eine gleichmäßige Verteilung des gelösten Ozons im gesamten Badvolumen zu erreichen. Gleichzeitig wurden Pumpenstärke und Umwälzkonzepte angepasst, um Totzonen zu vermeiden und einen stabilen Stofftransport an die Bauteiloberfläche zu gewährleisten.

Während der Inbetriebnahme und frühen Versuchsphase zeigte sich, dass die anfängliche Umwälz- und Einspeisekonfiguration nicht zu einer hinreichend homogenen Prozessführung führte. Die Beschichtung war positionsabhängig, da die Einströmung einseitig ausgeführt war. Diese Inhomogenität spiegelte sich in einer verminderten Beschichtungsqualität und deutlich niedrigeren Haftfestigkeiten in ungünstig angeströmten Bereichen wider. Die Beobachtung bestätigte damit die aus der Scale-up-Planung abgeleitete Relevanz der Strömungsführung. Als Korrekturmaßnahme wurde die Einströmung konstruktiv optimiert und auf eine rundumlaufende Ringeinspeisung umgestellt. Der Effekt war unmittelbar erkennbar: Die Ausgasung von Ozon aus dem Medium wurde deutlich reduziert, was als Indikator für einen effizienteren Gaseintrag und eine homogenere Verteilung im Bad gewertet werden kann (vgl. Abb. 3). In der Folge ist die Positionsabhängigkeit der zu beschichtenden Bauteile im Beizmedium deutlich reduziert worden.

Vor Umbau Positionierung Einströmungsrohre auf einer Seite



Nach Anpassung der Einströmrohre rundumlaufend

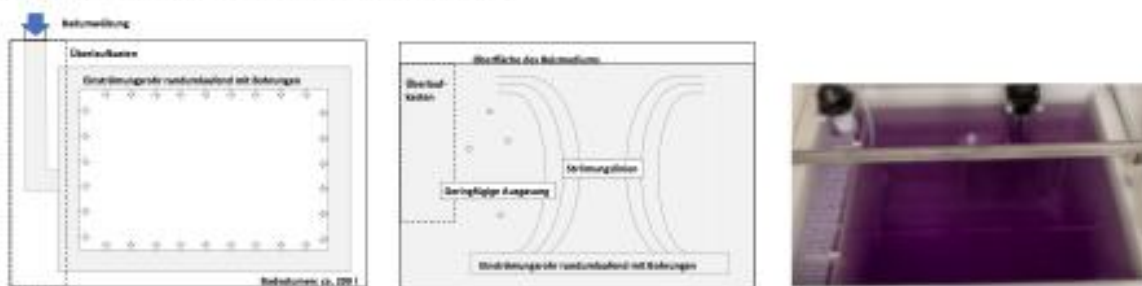


Abb. 3: Vergleich der Strömungseigenschaften vor und nach Änderung der Einströmung.

Das Kontaktormodul und der Ozongenerator waren ursprünglich vom Hersteller für das Beizen von Siliziumoberflächen entwickelt und bereits im 300 l-Maßstab eingesetzt worden. Daraus ergab sich der Vorteil, dass wesentliche Komponenten materialseitig für ozon- und säurehaltige Umgebungen ausgelegt sind und grundsätzlich einen sicheren Dauerbetrieb ermöglichen. Im Kontaktormodul wird das Ozongas – analog zum Laborprinzip – in die durchströmende wässrige Phase eingebracht und unter Druck gelöst. Durch Variation der kritischen Betriebsparameter, insbesondere Druck, Temperatur, Verweilzeit und Zusammensetzung des Beizmediums, wurde die Effizienz des Ozoneintrags im Technikumsmaßstab so optimiert, dass analytisch vergleichbare Ozonkonzentrationen wie im Laborbetrieb erreicht werden konnten. Ein entscheidender Unterschied zum Laboraufbau besteht darin, dass im Technikumsaufbau ein Regelsystem zur automatischen Einstellung der Ozonkonzentration integriert ist. Dadurch bleiben die Beizbedingungen über die Versuchsdauer konstant, was die Reproduzierbarkeit deutlich verbessert und den manuellen Kontrollaufwand aus dem Laborbetrieb ersetzt. Gleichzeitig ist diese Automatisierbarkeit ein wesentliches Kriterium für die spätere Skalierbarkeit in Richtung Produktionsanlage.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Kontaktierung und Bauteilaufnahme. In der Praxis beeinflussen Gestellgeometrie, Bauteilabstand, Eintauchbewegung und Entgasungsvorgänge die Gleichmäßigkeit der Oberflächenaktivierung. Aus den Testergebnissen wurden Designanpassungen abgeleitet und schrittweise umgesetzt. Die iterative Vorgehensweise – testen, bewerten, anpassen – war darauf ausgerichtet, nicht nur kurzfristige Verbesserungen zu erzielen, sondern eine stabile Betriebsweise für die folgenden Teilpakete zu schaffen.

Die Ergebnisse von AP3.1 zeigten, dass durch geeignete Entwicklungen an Einspeisung und Umwälzung die Schwankungen der Beschichtungsqualität signifikant reduziert werden können. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Überwindung des aus dem Labormaßstab bekannten Hauptproblems (inhomogene Ozonverteilung) geleistet.

AP3.2 Untersuchung des Verhaltens des Ozongenerators in Anwendungsumgebung und Anpassung dessen entsprechend der Ergebnisse

Der Ozongenerator stellt ein zentrales Aggregat dar, dessen Verhalten im galvanischen Umfeld nicht allein über Herstellerdaten abbildbar ist. In AP3.2 wurde daher das Generatorverhalten im realen Anwendungsumfeld untersucht. Dazu gehören u.a. die Anpassung und Optimierung des Ozoneintrags in das Beizmedium, um möglichst hohe Effizienz zu erzielen und die Konzentration an Ozon im Abluftstrom möglichst gering zu halten. Insbesondere die Variation der Durchflussgeschwindigkeit als auch des Drucks und der Konzentration von Ozon im Gasstrom haben einen entscheidenden Einfluss auf die zu erzielende Ozonkonzentration in der Beizlösung. Die Kinetik des Gaseintrags hat damit auch direkten Einfluss auf die Geschwindigkeit des Anfahrens bis zur Erreichung der Betriebsparameter und eröffnet Potentiale die Generatorkapazität genau auf den Anwendungsfall einzustellen. Potenzielle Korrosions- und Materialbeständigkeitsfragen sowie die Robustheit der Regelung bei wechselnden Lastfällen stellen weitere wichtige Aspekte dar.

Ein besonderes Augenmerk lag auf der Anpassung der Generator-Kapazität an die Beckengröße und an die gewünschte Prozessdynamik. Im Technikumsbetrieb ist nicht nur die maximale Ozonleistung relevant, sondern auch die Fähigkeit, stabile Sollwerte zu halten, definierte Anfahr- und Abfahrprozeduren umzusetzen und auf Störungen kontrolliert zu reagieren. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sind unmittelbar skalierungsrelevant, weil sie die Auslegung der Ozoneinspeisung und der Sicherheitsperipherie in größeren Anlagen beeinflussen.

Als Ergebnis wurden anwendungsangepasste Betriebsparameter festgelegt und Anforderungen an die Einbindung in die Anlagensteuerung definiert. Damit wurde die Grundlage geschaffen, den Beizprozess für nächste notwendige Skalierungsschritte zu entwickeln.

AP3.3 Untersuchung des chemischen Prozessverhaltens und Entwicklung eines spezifischen Prozessablaufs für ausgewählte Anwendungen

Nachdem die Anlagenbasis stabilisiert war, wurde in AP3.3 das chemische Prozessverhalten systematisch untersucht. Ziel war es, für ausgewählte Anwendungen spezifische Prozessabläufe zu entwickeln, die sowohl in der Oberflächenaktivierung als auch in der nachfolgenden Metallabscheidung robuste Ergebnisse liefern. Dazu wurden verschiedene Prozessrouten verglichen bzw. abgewandelt, darunter ionogene, kolloidale und Direktprozesse. Die Auswahl solcher Routen hat in der Praxis wesentlichen Einfluss auf Aktivierungsdichte, Haftmechanismen und Prozessfenster.

In dieser Phase wurden Prozessparameter gezielt variiert und anhand definierter Prüfkriterien bewertet. Neben klassischen Qualitätsmerkmalen wie Haftfestigkeit und optischer Homogenität

wurden auch Aspekte wie Selektivität bei Mehrkomponententeilen, Prozesskompatibilität mit typischen Bauteilmaterialien und die Robustheit gegenüber Bauteilvarianz betrachtet. Gerade im Sanitär- und Automobilbereich treten unterschiedliche ABS-Compounds, Additivpakete und Oberflächenzustände auf, die in einem robusten Prozessfenster abgedeckt werden müssen.

Im Verlauf der Beschichtungs- und Qualifizierungsarbeiten hat sich immer weiter herauskristallisiert, dass nicht nur das Beizverfahren für den Prozess entscheidend ist, sondern die gesamte Prozesskette aufeinander abgestimmt werden muss. Als nachteilig hat sich in diesem Zusammenhang herausgestellt, dass im Technikum des TBK galvanische Elektrolyte unterschiedlicher Anbieter verwendet werden und die Prozessführung auch teils limitiert ist. Der Aktivierungs- und initiale Beschichtungsprozess ist ein metastabiles System, welches im Betrieb fragil ist und leicht gestört werden kann. So ist die Haltbarkeit des Palladium-Aktivators und des chemisch Nickels selbst unter optimalen Bedingungen limitiert. Kontaminationen mit anderen Metallen, z.B. durch Verschleppungen von einem Bad in das andere tragen zusätzlich zu einer Verschlechterung der Beschichtungsbedingungen bei, die meist nur durch einen Neuansatz behoben werden können. Hier haben sich während der Bemusterungsversuche deutliche Unterschiede in den vermeintlich identischen Produkten herausgestellt. Bei ansonsten gleicher Konzentration der Wirkkomponenten erreicht man unter identischen Bedingungen auf einmal unvollständige Metallisierung oder Gestellbeschichtung, schlechte Selektivität, schlechte Haftfestigkeit und/oder mangelnde optische Qualität der Beschichtung. Dies erschwert die Qualifizierung der Musterteile für potentielle Kunden der Technologie und wirft zwangsläufig die Frage auf, ob das Verfahren auch mit den aktuell betriebenen Elektrolyten in der Kundenanlage funktioniert. Darüber hinaus sind die Beschichtungsbedingungen und äußeren Rahmenbedingungen von einer Kundenanlage zur anderen auch sehr unterschiedlich. Während im Bereich Automotive hauptsächlich kolloidale Aktivatoren eingesetzt werden, hat sich für die Beschichtung von Sanitärteilen weitgehend die Direktmetallisierung durchgesetzt. Letztere hat den Vorteil, dass weniger Prozessschritte erforderlich sind, aber die eingesetzten Chemikalien sind auch deutlich kostspieliger und fragiler. Letztlich steht in solchen Anlagen zumeist nicht der notwendige Platz zur Verfügung, um die Beschichtungstechnologie auf kolloidal umzustellen. Die bisherigen Beschichtungsversuche basieren alle auf dem kolloidalen Aktivatorverfahren. Versuche mit der Direktmetallisierung zeigen, dass diese potentiell ebenfalls einsetzbar ist. Eine genaue Qualifizierung der Beschichtungsqualität steht noch aus.

Im Beschichtungsprozess wird die Bauteiloberfläche durch die erste Metallschicht (chemisch Nickel) elektrisch leitfähig und kann galvanisch beschichtet werden. Um die Leitfähigkeit zu erhöhen, wird entweder mit einem Nickel-Strike Verfahren oder mit Sudkupfer gearbeitet. In unseren Versuchen hat sich gezeigt, dass Sudkupfer nur unter bestimmten Bedingungen mit dem verwendeten kolloidalen Aktivator genutzt werden kann und dass die Haftung zumeist im Vergleich zu Nickel-Strike leidet. Leider ist die Anlagentechnik zum Betrieb eines Nickel-Strike Elektrolyten deutlich aufwendiger, weshalb nicht alle Kundenanlagen diesen Prozess etabliert haben.

Die Ergebnisse führten zur Definition anwendungsbezogener Prozessfenster und zu einer Zuordnung, welche Prozessroute für welche Bauteilfamilie die besten Ergebnisse liefert. Hierbei wurde auch das bereits aus den Vorarbeiten bekannte Thema der Selektivitätsbeeinflussung bei Mehrkomponententeilen vertieft. Die Ozon-Beiztechnologie zeigte dabei weiterhin das Potenzial, Werkstoffgrenzen sauber abzubilden und gezielt unbeschichtete Bereiche zu erhalten, was für design- und funktionsgetriebene Bauteile (z. B. hinterleuchtete Symbole) relevant ist.

AP3.4 Validierung der Zielparameter und der erzielbaren ökologischen Auswirkungen des Gesamtprozesses

In AP3.4 wurden die in den vorangegangenen Schritten entwickelten Prozesse hinsichtlich der Zielparameter validiert und in eine vollständige Prozessbeschreibung überführt. Dabei ging es um die belastbare Aussage, dass die Technologie nicht nur unter Labor- oder Technikumsbedingungen funktioniert, sondern dass sie unter den definierten Randbedingungen reproduzierbar Ergebnisse liefert, die marktseitigen Anforderungen entsprechen.

Ein zentraler Baustein war die Festlegung produktionsbegleitender Maßnahmen zur Qualitätskontrolle. Dazu gehören beispielsweise definierte Badpflege- und Monitoringkonzepte, Kriterien für die Freigabe von Bädern, Prüfintervalle und Referenzbauteile zur Beurteilung der Metallisierungsqualität. Solche Maßnahmen sind entscheidend, um die Brücke zwischen Entwicklung und Serienbetrieb zu schlagen und auf die jeweiligen Kundenbedürfnisse eingehen zu können.

Parallel wurde der ökologische Impact des Gesamtprozesses bewertet. Hierbei steht die Cr(VI)-Freiheit als wesentliches Merkmal im Vordergrund, jedoch sind auch Emissionen (insbesondere Ozon/Abluft), Abwasserprofile, Chemikalienverbrauch und potenzielle Nebenprodukte relevant. Ziel war es, eine belastbare Argumentationsgrundlage für die spätere Genehmigung und Markteinführung zu schaffen und die Technologie gegenüber Alternativverfahren zu positionieren.

Als entscheidende Vorteile der Ozonbeiztechnologie steht der Gedanke der zirkulären Kreislaufwirtschaft. Der für den Prozess erforderliche Sauerstoff steht allgegenwärtig zur Verfügung. Durch elektrische Corona-Entladung im Generator wird daraus Ozon erzeugt, welches für den Beizprozess verwendet wird. Durch chemischen Verbrauch bzw. Zersetzung im Gaswäscher der Abluftanlage zerfällt Ozon wieder zu Sauerstoff, so dass die Abluftgrenzwerte mit einfachem Aufwand eingehalten werden und die Abluft bedenkenlos an die Umgebungsluft abgegeben werden. Zudem werden für dieses Verfahren deutlich weniger Chemikalien, wie Säuren verwendet, die im Anschluss einfach neutralisiert werden können. Als zusätzlicher Treiber für unser Ozonbeizverfahren hat sich eine mögliche regulatorische Beschränkung für die Verwendung von poly- und perfluorierten Substanzen (PFAS) erwiesen, da solche Substanzen als Tenside sowohl im Beizprozess als auch im Schritt der galvanischen Verchromung zwingend eingesetzt werden. Das StratOx Verfahren kommt gänzlich ohne die Verwendung von solchen PFAS Verbindungen aus.

Im AP3 wurde im **Meilenstein MS2** die Validierung der Zielparameter definiert. Der Nachweis erfolgte durch dokumentierte Versuchsergebnisse, Prüfberichte und eine konsolidierte Prozessbeschreibung. Es zeigt sich, dass die Prozessparameter – wie auch beim aktuellen Verfahren auf Chromschwefelsäurebasis – stark von äußeren Bedingungen, wie verwendete Kunststoffsorte, Spritzgussqualität und Einhaltung der Vorgaben an Elektrolyte abhängig ist und damit nicht universell für alle Kunden identisch sind.

Der **Meilenstein MS2** wurde erreicht, nachdem die definierten Zielparameter anhand ausgewählter Bauteile und Prüfungen erzielt und in Prozessvorgaben überführt wurden.

AP4 Entwicklung einer Gesamtkonzeption für die Überführung der Projektergebnisse in eine Anwendung mit 1.400 l Tank; Meilenstein MS4

Im vierten Arbeitspaket wurden die Projektergebnisse in eine Gesamtkonzeption für eine großtechnische Anwendung überführt. Ziel war nicht die unmittelbare Realisierung, sondern die Erstellung einer belastbaren technischen Grundlage, die Layout, Schnittstellen, Genehmigungsfähigkeit und wesentliche Auslegungsparameter abdeckt. Die Auslegung eines 1.400 l-Tanks ist dabei nicht als reine Volumenskalierung zu verstehen, sondern erfordert eine gezielte Betrachtung von Strömungsdynamik, Rückflusssystemen, Wärmehaushalt und Stofftransport, um die im 200 l-Maßstab erreichte Homogenität und Prozessstabilität reproduzieren zu können. Ein Schema der Kundenanlage ist in Abb. 4 dargestellt. Die Installation der Ozonbeiztechnologie ist im Bad Pos. 48 mit einem Volumen von ca. 1.400 l geplant. Um eine adäquate Durchmischung und Anströmung im Beizbecken zu erreichen, wurde vorgesehen, die Einmischung des gelösten Ozons und die Badumwälzung unabhängig voneinander einzubauen. Dies erlaubt eine einfachere und stabilere Anströmung des Mischmoduls und optimale Ozonsättigung im Beizmedium, während die Homogenisierung durch einen separaten Kreislauf gewährleistet wird. Dadurch lassen sich bereits vorhandene Pumpen aus PVDF weiterverwenden und gezielt auslegen. Die notwendige Abluftkapazität zur Abführung von ausgasendem Ozon ist durch die vorhandene Badabsaugung gewährleistet und die Wäscher haben ein hinreichendes Potential, um das in der Abluft enthaltene Ozon unter den zulässigen Abluftgrenzwert zu reduzieren.

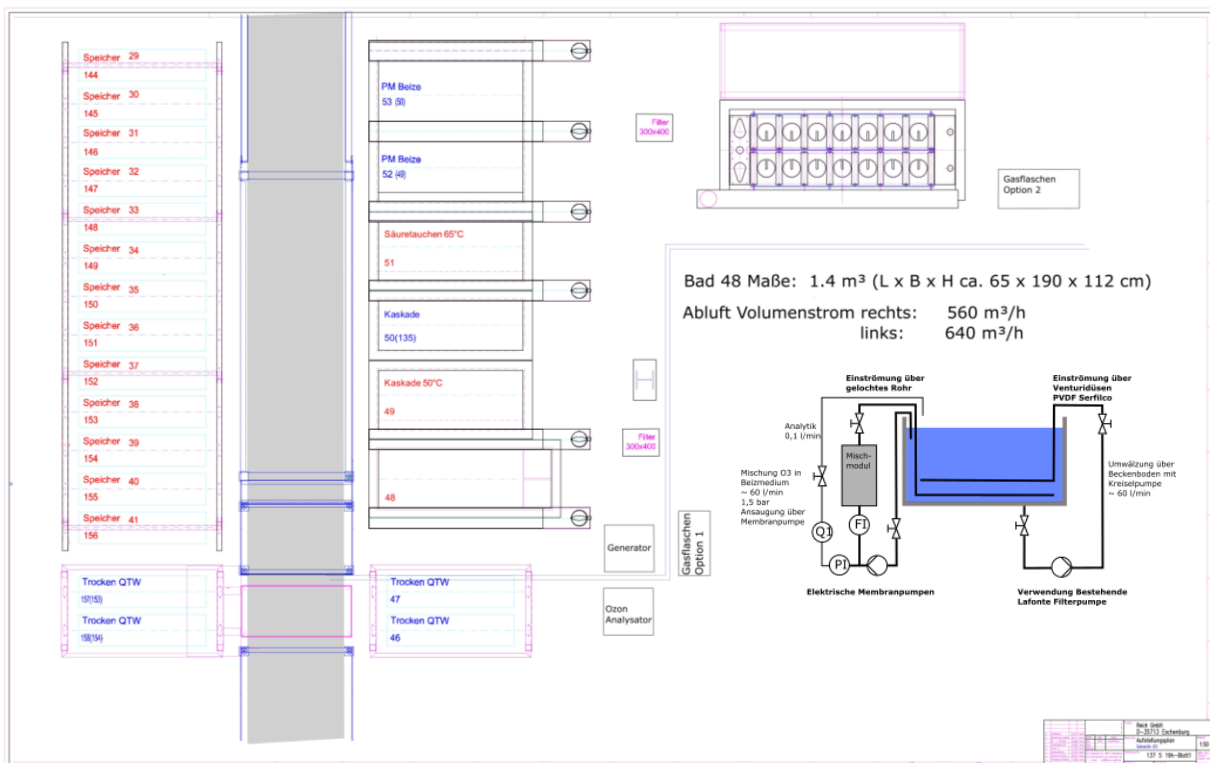


Abb. 4: Anlagenschema des Pilotkunden und Schema der Badauslegung mit Ozongenerator und Umwälztechnik.

Im ersten Schritt wurde ein Tanklayoutkonzept erstellt, das Rückflussführung, Positionierung von Eintragsstellen, Heizung sowie konstruktive Randbedingungen berücksichtigt. Darauf aufbauend erfolgte die Analyse der Schnittstellen und Anschlüsse, einschließlich Medienversorgung, Mess- und Regeltechnik sowie Abluft- und Sicherheitsperipherie.

Das Ergebnis war ein abgestimmtes Konzeptdokument, das als Grundlage für Detailengineering, Kostenkalkulation und spätere Realisierung in der Kundenanlage dient. Mit diesem Konzept wurde **Meilenstein MS4** erreicht.

Abweichungen, Probleme und Lessons Learned

Auch bei planmäßigem Verlauf treten in Scale-up-Projekten typische Herausforderungen auf. Dazu zählen unerwartete Wechselwirkungen zwischen Badchemie und Anlagenmaterialien, Randbedingungen der Infrastruktur (Lüftung, Medienversorgung) sowie abweichende äußere Anforderungen durch die Kunden- und Marktseite.

In diesem Projekt war das zentrale technische Risiko das Scale-up der Beiztechnologie in den Technikumsmaßstab und die Etablierung stabiler Beschichtungsbedingungen. Durch die systematische Bearbeitung konnten entsprechende Maßnahmen abgeleitet und umgesetzt werden. Nichtsdestotrotz gibt es einige unplanbare Umstände und Erkenntnisse, die bei der weiteren Prozessentwicklung im Folgeprojekt in den Fokus rücken:

- Im Zuge der Beschichtungsversuche in der Technikumsanlage wurde es immer deutlicher, dass die gesamte Metallisierungschemie genau aufeinander abzustimmen ist. Kleine Abweichungen der Optimalparameter führen zu schlechter Metallisierung, offenen Stellen, Überwachungen, Gestellmetallisierung, optischen Defekten und/oder mangelnder Haftfestigkeit. Durch die Definition und regelmäßige analytische Überprüfung der Bedingungen konnten bereits einige Unwägbarkeiten ausgeräumt werden, aber es zeigt sich weiterhin, wie fragil das Beschichtungs-System als solches ist. Im größeren Maßstab und unter Serienproduktionsbedingungen werden die Beschichtungseigenschaften erfahrungsgemäß deutlich stabiler, jedoch sollten mögliche Probleme bei der Planung bereits berücksichtigt werden. Da die aktuell verwendeten Prozesschemikalien von unterschiedlichen Anbietern stammen, soll die gesamte Verfahrenschemie künftig auf einen Anbieter umgestellt werden, der – falls nötig – auch Anpassungen an der Rezeptur umsetzen kann.
- Wie bereits beschrieben wurde das StratOx-Verfahren primär für das kolloidale Aktivatorsystem entwickelt. Insbesondere Kunden aus der Sanitärindustrie setzen traditionell eher auf Direktmetallisierungsverfahren. Es konnte gezeigt werden, dass dieses Verfahren auch prinzipiell mit der Ozonbeize verwendet werden kann, in Zusammenarbeit mit den Hersteller der Aktivatoren und dem Endkunden müssen die genauen Beschichtungsbedingungen jedoch noch erstellt und validiert werden.
- Die Anpassungen der Anströmung der Bauteile hat sich als wirkungsvoller Einflussfaktor auf die Beschichtungsqualität herausgestellt. In weiteren Versuchen soll insbesondere in Hinblick auf die kommenden Upscaling-Schritte, die Anströmung durch die Verwendung von Venturidüsen weiter verbessert werden. Diese haben den Vorteil, dass der Volumenstrom im Bypass der Anlage nicht vergrößert werden muss, was zu deutlichen Mehrkosten bei der Verrohrung und Pumpentechnik führen würde, sondern dass diese Düsen mehr oder weniger in die bestehende Peripherie integriert werden können.
- Während in Laborversuchen die ungewünschte Gestellmetallisierung keine Rolle gespielt hat, muss dies in Hinblick auf die Serienfertigung erneut betrachtet werden. Im Technikum ist aktuell keine gesonderte Entmetallisierung der Gestelle nach dem Metallisierungsumlauf vorgesehen. Dies ist in der Serienproduktion Standard und wird auch im Labor so bewerkstelligt. Im TBK behelfen wir und momentan eines Spülbehälters, der mit

Entmetallisierungslösung gefüllt ist, jedoch nicht gut kontrolliert werden kann. Sollte eine Verbesserung der Entmetallisierungsbedingungen widererwarten weiterhin zu Gestellmetallisierung führen, können wir die Formulierung unserer Gestellisierungspaste auch entsprechend auf den Prozess anpassen.

- Durch den Schulbetrieb ist es mehrfach zu Kreuzkontaminationen der Nickel- und Kupferelektrolyte gekommen, die im Nachhinein aufwendig herausgearbeitet werden mussten. In Rücksprache mit den jeweiligen Verantwortlichen wurden organisatorische Maßnahmen besprochen, um diesen Faktor künftig auszuschließen.

Technische Herausforderungen, die die Arbeiten an der Projektbearbeitung beeinflusst haben, waren die folgenden:

- Beim Bau des TBK Technikums wurden Fehler gemacht, die erst nach Inbetriebnahme offensichtlich wurden und dann im laufenden Betrieb beseitigt werden mussten. Dies betrifft
 - Die Verwendung falscher Materialien für die Wärmetauscher in sauren Prozessen der Kunststoffvorbehandlung, die zu Kontamination und Ausfall des Aktivators geführt haben.
 - Es wurden Versorgungsleitungen fälschlicherweise zusammen in einem Kanal verlegt, die aus brandschutztechnischen Gründen so nicht verlegt werden dürfen und rückgebaut werden mussten, was zu ca. 4 Wochen Zeitverzug geführt hat.
 - Die Heizungssteuerung ist nach einem Systemupdate für zwei Prozesswannen defekt, so dass die Maximaltemperatur überschritten wurde und Aktivator und chemisch Nickel neu angesetzt werden mussten.
 - Umprogrammierung der Gleichrichter für den Nickel-Strike Elektrolyten, so dass die Beschichtung mit Nickel ohne Anbrennungen durchgeführt werden kann.

Die meisten dieser aufgezählten Punkte kann man als Lessons Learned zählen, die ungeplant während der Projektbearbeitung aufgetreten sind, aber zur Stabilisierung der Prozesse beigetragen. Darüber hinaus gibt es aber auch Themen, die in der Weiterführung gesondert betrachtet werden sollten.

Auch innerhalb der Projektlaufzeit ist klar geworden, dass nicht alle Industriebeteiligten ein Interesse daran haben neue Technologien aktiv zu unterstützen. Hürden, die mit den richtigen Partnern überbrückt werden müssen:

- Never change a running system: mit viel Lobby-Arbeit möchte man bei alten Verfahren bleiben und nichts ändern. So kann zumindest die jetzige Generation an Unternehmern ohne Aufwand die größten Gewinne erzielen.
- Risikoübernahme: bei einigen großen Beschichtern hat sich die Einstellung verbreitet, dass Risiko, Verantwortung und Kosten vom Systemanbieter komplett übernommen werden müssen.
- Traditionelles Unternehmertum: steht oft in Konflikt mit disruptiven Ideen. Die Angst vor Neuem überschattet oft den Mut zu Größerem.
- Investitionskosten- und aufwand: technische und Führungsebene sind nicht selten schlecht vernetzt. Beide Parteien müssen abgeholt werden und bereit sein den nächsten Schritt zu gehen.

- Nachhaltigkeit als Business-Case: dass umweltfreundliche Systeme die der Zukunft sind, haben einige Unternehmer noch nicht verstanden und bauen ihren Business Case nicht auf/mit solchen auf. Nachhaltigkeit als Stichwort ist meist bereits negativ belastet.
- Bürokratie: gefangen in eigenen Strukturen scheitern viele an ihren eigenen Auflagen, Abläufen und Verantwortlichkeiten.

Fazit und Ausblick

Das Projekt hat erfolgreich nachgewiesen, dass eine ozonbasierte, Cr(VI)- und PFAS-freie Beiztechnologie für ABS-Kunststoffe eine tragfähige Alternative zur konventionellen Chromschwefelsäurebeize darstellt. Die Überführung in einen technisch relevanten Demonstrationsmaßstab (200 l) am Technischen Berufskolleg Solingen wurde planmäßig umgesetzt und alle definierten Meilensteine erreicht.

Scale-up-Risiken, wie die inhomogene Verteilung von gelöstem Ozon im Beizmedium, konnten durch systematische anlagentechnische Optimierungen erfolgreich adressiert werden. Durch konstruktive Anpassungen wurden positionsabhängige Schwankungen in der Beschichtungsqualität signifikant reduziert. Unter optimierten Bedingungen wurden Haftfestigkeiten oberhalb der industriellen Zielvorgabe von 7 N/cm erreicht und die Anforderungen an die optische Beschichtungsqualität erfüllt, was die prinzipielle Eignung der Technologie für industrielle Anwendungen belegt. Die erfolgreiche Beschichtung verschiedener Kundenbauteile aus den Bereichen Sanitär und Haushaltswaren zeigt die Breite der Anwendbarkeit und hat bereits Interesse bei möglichen Kunden geweckt.

Die Technikumsanlage wurde über mehrere Monate stabil betrieben und als integriertes System in die vollständige Plating-on-Plastics-Prozesskette eingebunden. Das entwickelte Sicherheitskonzept für den Ozonbetrieb erwies sich als praxistauglich und bildet eine gute Grundlage für künftige Genehmigungsverfahren.

Die ökologischen Vorteile der Technologie sind insbesondere: Die vollständige Cr(VI)-Freiheit adressiert die REACH-Anforderungen, die PFAS-Freiheit des Beizverfahrens bietet zusätzliche Zukunftssicherheit, und das Kreislaufprinzip des Ozons (Erzeugung aus Luftsauerstoff, kontrollierte Rückführung) entspricht dem Nachhaltigkeitsgedanken.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse bilden eine solide Ausgangsbasis für die weitere Entwicklung in Richtung industrieller Anwendung. Die erstellte Gesamtkonzeption für eine 1.400 l-Anwendung zeigt einen realistischen Weg zur nächsten Entwicklungsstufe auf. Für eine abschließende Bewertung der Serientauglichkeit ist die Erprobung in einem größeren Maßstab unter realen Produktionsbedingungen einer voll-automatisierten Beschichtungsanlage erforderlich. Eine Pilotanlage beim Industriepartner würde es ermöglichen, offene Fragen zur Langzeitstabilität, Badpflege im Mehrschichtbetrieb, Durchsatzleistung und Wirtschaftlichkeit zu klären.

Entsprechend wurden wichtige Entwicklungsbedarfe identifiziert, die zu einer Industrialisierung führen:

- Die Empfindlichkeit der Gesamtprozesskette gegenüber Badchemie, Verschleppung und Alterung erfordert eine systematischere Abstimmung aller Prozessschritte.
- Weiterentwicklung der Strömungsführung (z.B. Venturidüsen) für komplexe Bauteilgeometrien
- Vollständige Qualifizierung der Direktmetallisierungsrouten für Sanitäranwendungen mit systematischen Prüfplänen und Kundenfreigaben
- Erweiterung auf anspruchsvollere Automotive-Anwendungen zur Erschließung weiteren Marktpotenzials

Angesichts der anhaltenden regulatorischen Unsicherheit bei Cr(VI)-Verbindungen und der unzureichenden Alternativen auf Manganatbasis besteht weiterhin erheblicher Bedarf an tragfähigen Lösungen. Die ozonbasierte Technologie hat ihr Potenzial im Technikumsmaßstab unter Beweis gestellt; eine Validierung im Produktionsmaßstab würde die Lücke zwischen Entwicklung und breiter Anwendbarkeit schließen.

Die erfolgreiche Entwicklung könnte einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Galvanikindustrie leisten und gleichzeitig Umwelt- und Arbeitsschutzstandards signifikant verbessern. Ein Folgeprojekt zum Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage erscheint daher fachlich gerechtfertigt und würde die im aktuellen Projekt geschaffene Basis konsequent weiterentwickeln.

Eine Unterstützung der Technologie aus Sicht der marktdominierenden Systemlieferanten macht leider nur bedingt Sinn. Zum einen wurde in der Vergangenheit zu viel Geld in die Entwicklung von Mangan-Alternativen investiert, welche sich bisher weder technisch noch kostentechnisch als umsetzbar darstellten. Zum anderen bedient man globale Märkte, wodurch sich eine Verlagerung aus Europa in Märkte wie USA oder China nur bedingt negativ auf die Umsätze auswirken.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Technologie den Stand erreicht hat, um den nächsten Schritt zu gehen. Ganz besonders wichtig ist dabei die richtige Partnerwahl!