

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Abschlussbericht

zum Vorhaben

„WICOATEC®- CVD Dünnschichttechnik zur Beschichtung von Metallbauteilen“

KfW-Aktenzeichen: NKa3 – 003265

Zuwendungsempfänger/-in

Wieland Wicoatec GmbH

Graf-Arco-Straße 36

89079 Ulm

Umweltbereich

Ressourcen und Klimaschutz

Laufzeit des Vorhabens

29.06.2017 – 30.12.2019

Autor/-en

Andreas Torka; Tel. 0731/944-2054

Pedro Mayser; Tel. 0731/944-2449

Roland Knoblich; Tel. 0731/944-3930

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit**

Vöhringen, den 19.10.2020

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen UBA: NKa3	Projekt-Nr.: 003265
Titel des Vorhabens: „WICOATEC–CVD Dünnschichttechnik zur Beschichtung von Metallbauteilen“	
Autor/-en (Name, Vorname): Torka, Andreas; Tel. 0731/944-2054 Mayser, Pedro; Tel. 0731/944-2449 Knoblich, Roland; Tel. 0731/944-3930	Vorhabenbeginn: 29.06.2017
	Vorhabenende (Abschlussdatum): 31.12.2019
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): Wieland Wicoatec GmbH Graf-Arco-Straße 36 89079 Ulm	Veröffentlichungsdatum: 22. Januar 2018
	Seitenzahl: 1
Gefördert im BMUB-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.	
<p>Kurzfassung: Auf Basis eines weltweit neuartigen Dünnschichtprozesses in CVD-Technik können Metallbauteile mit komplexen Oberflächen mit einem Dünnschichtprozess noch wirksamer als bisher gegen Korrosion, Scaling und Fouling geschützt werden. Der vollständige Verzicht auf Vakuumtechnologie, die deutliche Absenkung der Prozesstemperatur und die konsequente Verringerung des benötigten Chemikalieneinsatzes über das patentierte Verweilzeitkonzept (Mehrfach-Pass), führen zu einer Verringerung des Energieverbrauchs und Verbesserung der Umweltfreundlichkeit im Vergleich zur etablierten Technik in Form des Hochtemperatur CVD-Verfahrens. Es konnten folgende umwelttechnische Verbesserungen nachgewiesen werden: Silan: - 95%, Essigsäure: - 95%, Aluminium: - 99%, elektrische Energie: - 90% und Erdgas: - 80%. Als Bezugsgröße ist der jährliche Verbrauch berechnet, der ansonsten mit einem konventionellen Hochtemperatur CVD-Prozess zur Beschichtung von 3.600 t Aluminiumteile benötigt würde. Diese Verfahrensverbesserungen wurden über einen patentierten Verweilzeitkonzept mit Einsatz eines Mehrfach-Pass Prinzips erreicht. Insgesamt kann für die Ausbringung mit dem neuartigen Dünnschichtprozess auf Basis der CVD-Technik 2.000 t CO₂-Äquivalente (- 87%) im Vergleich zur konventionellen Technik eingespart werden. Eine großtechnische Umsetzung ermöglichte eine Multiplikatoren Wirkung der gesamten Prozesskette für zukünftige Installationen.</p>	
<p>Schlagwörter: Weltweit einmaliger Dünnschichtprozess in CVD-Technik, Absenkung der Prozesstemperatur im Vergleich zur HT CVD-Verfahren, Metallbauteile mit komplexen Oberflächen, Korrosion, Scaling und Fouling, Reduzierung des Chemikalieneinsatzes, patentiertes Verweilzeitkonzept (Mehrfach-Pass Konzept), Energetische- und Umweltentlastungen</p>	
Anzahl der gelieferten Berichte: 9 Papierform: 9 Elektronische Datenträger: 9	Sonstige Medien: Veröffentlichung im Internet: ja Website: www.wieland-wicoatec.com

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Report Coversheet

Reference-No. Federal Environment Agency: NKa3	Project-No.: 003265
Report Title: WICOATEC® - CVD thin film technology for coating metal components	
Author/Authors (Family Name, First Name) Torca, Andreas; Tel. 0731/944-2054 Mayser, Pedro; Tel. 0731/944-2449 Knoblich, Roland; Tel. 0731/944-3930	Start of project: 29.06.2017 End of project: 31.12.2019
Performing Organisation (Name, Address): Wieland Wicoatec GmbH Graf-Arco-Straße 36 89079 Ulm	Publication Date: 22 nd January 2018
	No. of Pages: 1
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.	
<p>Summary: Based on a worldwide novel thin film process in CVD technology, metal components with complex surfaces can be protected even more effectively than before against corrosion, scaling and fouling with this thin film process. By completely waiving vacuum technology, a significant lowering of the process temperature and the consistent reduction of the required use of chemicals via the patented dwell time concept (multiple-pass) lead to a decrease of energy consumption and improvement of the environmental footprint, compared to the established technology in the form of the high-temperature CVD process. The following environmental improvements have been demonstrated: Silane: - 95%, acetic acid: - 95%, aluminum: - 99%, electrical energy: - 90% and natural gas: - 80%. As a reference value, the annual required consumption of a conventional high temperature CVD process has been calculated to coat 3,600 t of aluminum parts. These process improvements were achieved by the patented dwell time concept using a multiple-pass principle. In total, 2,000 t CO₂ equivalents (- 87%) can be saved on the output with the novel thin film process based on low temperature CVD technology, compared to conventional technology. A large-scale implementation enabled a multiplier effect of the entire process chain for future installations.</p>	
<p>Key words: Worldwide unique thin film process in CVD technology, reduction of process temperature compared to HT CVD process, metal components with complex surfaces, corrosion, scaling and fouling, reduction of chemical consumption, patented dwell time concept (multiple-pass concept), energy and environmental relief.</p>	

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	5
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner.....	5
1.2. Ausgangssituation.....	6
2. Vorhabenumsetzung	11
2.1. Ziel des Vorhabens.....	11
2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten).....	16
2.3. Umsetzung des Vorhabens.....	18
2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen).....	21
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten.....	21
2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms.....	22
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	22
3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung.....	22
3.2. Stoff- und Energiebilanz.....	23
3.3. Umweltbilanz.....	29
3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	32
3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren.....	33
4. Übertragbarkeit	37
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung.....	37
4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts.....	37
5. Zusammenfassung / Summary	39
6. Literatur	43
7. Anhang	43

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner

Wieland Wicoatec GmbH

Graf-Arco-Straße 36

89079 Ulm

Branche: Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung (WZ 2008 Code: 2561)

Kennzahlen (im Geschäftsjahr 2018/19):

Umsatz: 1.108.000 Euro / Mitarbeiterzahl zum Geschäftsjahresende: 31

Sitz der Gesellschaft: Ulm; Registergericht Ulm, HRB 735574

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer: DE314162231

Administrative Ansprechperson:

Dipl.-Ing. Pedro Mayser / Leiter Projektförderung / Telefon: 0731 944 2449 / Fax: 0731 944 4111

E-Mail: pedro.mayser@wieland.com

Projektleiter bis 15.04.2020:

Dr.-Ing. Till Merkel / Leiter Wieland Wicoatec / Telefon: 0731 944 2417 / Fax: 0731 944 42417

E-Mail: till.merkel@wieland-wicoatec.com

Projektleiter ab 16.04.2020:

Dipl.-Ing. Andreas Torka / Leiter Wieland Wicoatec / Telefon: 0731 944 2054

E-Mail: andreas.torka@wieland.com

Die Wieland Wicoatec GmbH ist ein junges Unternehmen, das leistungsstarke CVD-Beschichtungen im Dünnschichtsegment herstellt.

Im Süden Deutschlands entwickelt und produziert die Wieland Wicoatec GmbH Beschichtungen von hoher Qualität. Dafür stehen ein moderner Forschungsbereich der Wieland-Werke AG sowie Fertigungskapazitäten für unterschiedliche Bauteil- und Auftragsgrößen zur Verfügung.

Die Wieland Wicoatec GmbH wurde 2017 innerhalb der Wieland Gruppe gegründet. Die Beschichtungstechnologie wurde durch diese Ausgliederung als eigenständige Tochtergesellschaft der Wieland Gruppe am Standort Vöhringen fortgesetzt. Seit Oktober 2019 hat die Wieland Wicoatec GmbH eine DIN ISO 9001 Zertifikation mit dem Geltungsbereich für die Entwicklung, Produktion und Vertrieb von Dünnschicht-Beschichtungen.

Die Wieland-Werke AG mit Sitz in Ulm ist einer der weltweit führenden Hersteller von Halbfabrikaten aus Kupfer und Kupferlegierungen. Das Produktportfolio umfasst Bänder, Bleche, Rohre, Stangen, Drähte und Profile. Darüber hinaus fertigt Wieland Rippenrohre und Wärmeübertrager, Gleitlager und

Systembauteile sowie Komponenten. Die inländischen Werke befinden sich in Ulm, Velbert-Langenberg, Villingen-Schwenningen und Vöhringen/Iller.

Mit einem Sortiment von über 100 Werkstoffen aus Kupfer und Kupferlegierungen bietet Wieland optimale Produktlösungen für zahlreiche Branchen:

Elektronik und Elektrotechnik, Automobilindustrie, Maschinenbau, Kälte-, Klima- und Heizungstechnik sowie Bauwesen und Installation. Bei Bedarf wird das Angebot durch Werkstoffe wie Aluminium, Stahl oder Titan ergänzt.

Als einziger Hersteller von Halbfabrikaten aus Kupferlegierungen verfügt die Wieland-Werke AG über ein akkreditiertes Prüflabor gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2005. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Entwicklung von Werkstoffen, die eine effiziente Nutzung von Material- und Energieressourcen ermöglichen und dem Schutz von Umwelt und Gesundheit dienen. Möglich wird das vor allem durch die enge Zusammenarbeit mit Kunden sowie Instituten und Forschungseinrichtungen. Auf Basis jahrzehntelanger Erfahrung und kontinuierlicher Neu- und Weiterentwicklung von Werkstoffen, Produkten und Verfahren entstehen zukunftsorientierte Innovationen für Abnehmer auf der ganzen Welt, die zunehmend die traditionellen Halbzeug Produkte ergänzen.

Für eine sichere Versorgung der Kunden im In- und Ausland verfügt Wieland zudem über produzierende Gesellschaften, Schneidcenter und Handelsunternehmen in vielen europäischen Ländern sowie in den USA, in Asien und Südafrika.

1.2. Ausgangssituation

Für die Beschichtung von Bauteilen steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Bei den Dünnschicht-Technologien werden häufig SiO_2 -Schichten eingesetzt. Diese Schichten sind für viele Anwendungen interessant, weil diese eine sehr gute chemische Beständigkeit haben und es vielfältige Möglichkeiten zur Funktionalisierung gibt. Wirtschaftlich sind diese Schichten ebenfalls sehr attraktiv, da die eingesetzten chemischen Substanzen (Precursoren bzw. Vorläufersubstanzen) sehr gut verfügbar und kostengünstig sind.

Insbesondere modifizierbare Schichten lassen sich jedoch nur aus kondensierter Phase (Lacke, Sol-Gel-Systeme) aufbringen. Die ebenfalls verfügbaren Hochtemperatur CVD-Verfahren sind zwar für fast beliebige Geometrien einsetzbar. Sie sind jedoch nur für relativ kleine Bauteile mit einer hohen Temperaturbeständigkeit praktisch nutzbar. Bei hohen Temperaturen können sich Bauteile ansonsten ungewollt geometrisch z. B. über einen Verzug verändern oder auch wichtige mechanischen Eigenschaften verlieren.

Zur Beschichtung weit verbreiteter technischer Werkstoffe wie Aluminium, Kupfer oder vieler Stähle muss zu Beschichtungstemperaturen unter 350°C übergegangen werden. Hier stehen

plasmaunterstützte CVD-Prozesse zur Verfügung, die jedoch nur auf ebenen Oberflächen wirklich funktionieren.

Mit den sogenannten atmosphärischen CVD-Verfahren können die wesentlichen Anforderungen an ein Verfahren zur SiO₂-Beschichtung von metallischen Bauteilen dargestellt werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass eine Temperatur von unter 350°C, die Beschichtung von dreidimensionalen Oberflächen, der Einsatz kostengünstige Precursoren und vielfältige Möglichkeiten zur Funktionalisierung durch Variation der Precursoren möglich ist.

Grundprinzip und in der Patentliteratur dokumentierter Stand der Technik zur Absenkung der Prozesstemperaturen von > 900 auf < 350°C ist die Einkopplung chemischer Energie über gasförmige Katalysatoren, die eine hydrolytische Zersetzung der Precursoren bei mittleren Temperaturen ermöglichen. Den hervorragenden Schichteigenschaften stehen Barrieren bzgl. der Umweltverträglichkeit (hoher Brenngasverbrauch in der thermischen Nachverbrennung) gegenüber. In Voruntersuchungen ist es gelungen, die Überwindbarkeit dieser Barrieren im kleinen Maßstab nachzuweisen. Diese Weiterentwicklungen werden im Rahmen des durchgeführten Vorhabens auf großtechnische Systeme übertragen. Damit soll der Nachweis erbracht werden, dass atmosphärische CVD-Verfahren umweltverträglich und wirtschaftlich in der Großserie funktionieren.

Sowohl bei der Antragstellung als auch bei der Bearbeitung des Vorhabens wird als Bezug eine Serienfertigung angenommen. In der Literatur wird der Stand der Technik dokumentiert. Rechnerisch werden die eigenen Ergebnisse mit dem Forschungsvorhaben mit dem Stand verglichen.

Grundlage sind Vorarbeiten zu atmosphärischen CVD-Prozessen aus den 1960 bis 1990er Jahren. Die in der Literatur dokumentierten Apparaturen basieren auf einem sogenannten single pass-Konzept, d.h. die Prozessgase werden gemischt und dann mit einem Trägergasstrom (z.B. Stickstoff) auf die Bauteile zur Beschichtung geleitet (Abbildung 1, Seite 8). Dieses Konzept ist grundsätzlich wirksam, die Abscheideraten liegen unter 10 nm/h, die eingesetzten Prozesschemikalien werden zu mehr als 99% ungenutzt als Abgas aus dem Prozess ausgeschleust und müssen verbrannt werden (thermische Abgasbehandlung). Aufgrund des hohen Chemikalienverbrauchs, der niedrigen Abscheideraten und des hohen Aufwands für die Abgasbehandlung konnten sich die atmosphärischen CVD-Verfahren bisher aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht etablieren.

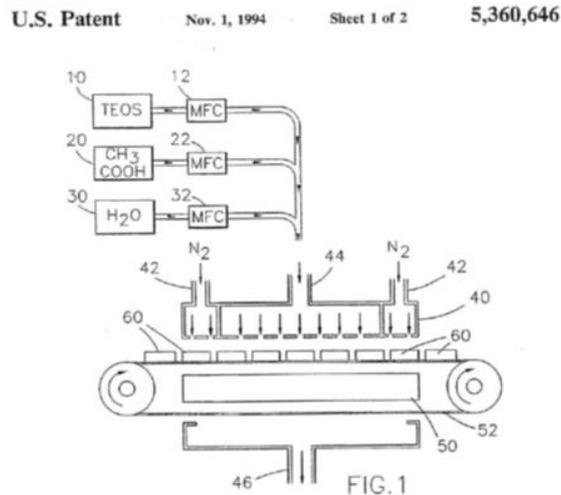


Abbildung 1

Stand der atmosphärischen CVD-Technik (Single Pass-Konzept)

Für das Beschichtungsverfahren existiert ein Stand der Technik aus der Patentliteratur aus den 1990er Jahren.¹ Hochrechnungen zu den Energie- und Massenbilanzen zeigen, dass eine großtechnische Produktion aus wirtschaftlichen und energetischen Gründen nicht sinnvoll umgesetzt werden kann. Die eigenen Entwicklungsarbeiten mit Laborversuchen lassen dahingegen erwarten, dass die WICOATEC[®]-spezifischen Weiterentwicklungen eine erfolgreiche Umsetzung für eine großtechnische Produktion ermöglichen. Zum Stand der Technik muss daher zusammenfassend festgestellt werden, dass es bisher nur Labor- und Pilotanlagen gibt. Diese sind vor allem auf Grund der geringen Volumina in der Beschichtungskammer alle nicht wirtschaftlich.

Grundlage für diese Aussage sind umfangreiche Daten, die zur Positionierung des WICOATEC[®]-Verfahrens gegenüber herkömmlicher Beschichtungstechnik erhoben wurden (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3, Seite 9).

Marktseitige Treiber für die Entwicklung der Technologie und deren großtechnische Umsetzung:

- Miniaturisierung von Bauelementen bzw. Erhöhung der Leistungsdichte (z. B. Wärmeübertragungsleistung / Bauvolumen) unter hochdynamischen Betriebsbedingungen führen zu Verschleiß, Leistungseinbußen durch Ablagerungen und Korrosion
- In vielen technischen Anwendungen (Investitions- und Konsumgüter) sind Schäden an Bauteilen durch Korrosion oder Leistungseinbußen durch Scaling und Fouling omnipräsent

¹ Morita, K.: Chemical Vapor Deposition Method of Silicon Dioxide Film, US 5,360,646 (1994)

Die Reduzierung von Schäden und Anlagenstillständen ist ein zentraler Stellhebel zur Hebung signifikanter Effizienzreserven in Produktionsprozessen und in der Endanwendung (vgl. ProcessNet-Initiative "Wanted Technologies").²

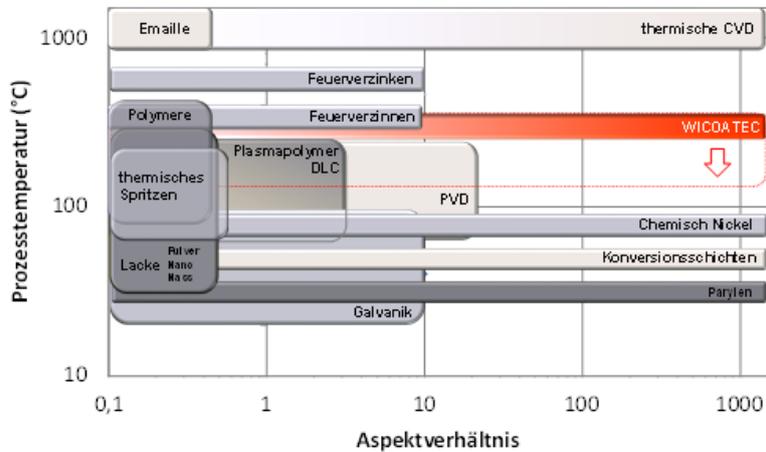


Abbildung 2
Prozesstemperaturen und Aspektverhältnisse³ von Beschichtungsverfahren im Vergleich

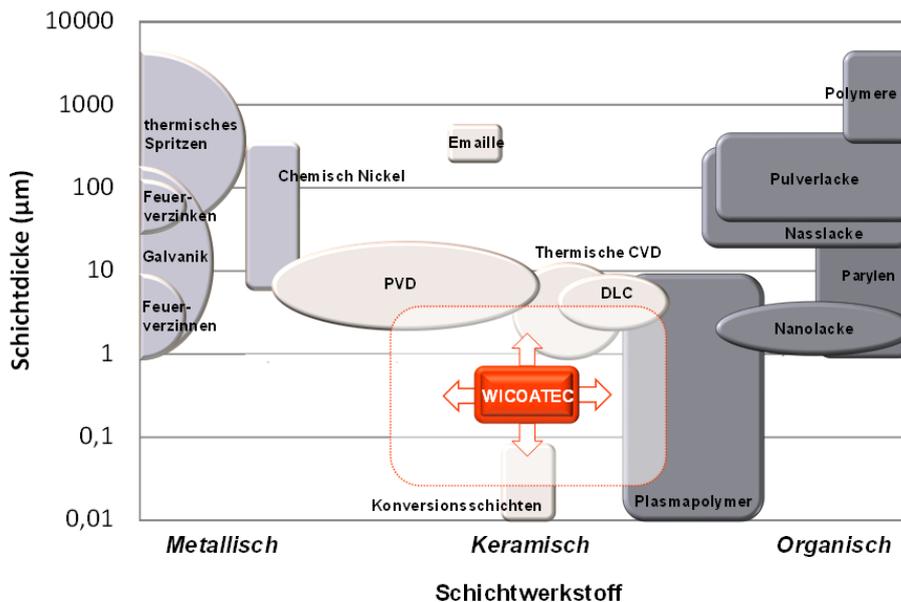


Abbildung 3
Typische Schichtdicken und Schichtwerkstoffe von Beschichtungsverfahren im Vergleich

² Chemie Ingenieur Technik, Special Issue: Innovative Apparate zur Effizienzsteigerung, [Volume 87, Issue 3](#), pages 185–187, March, 2015

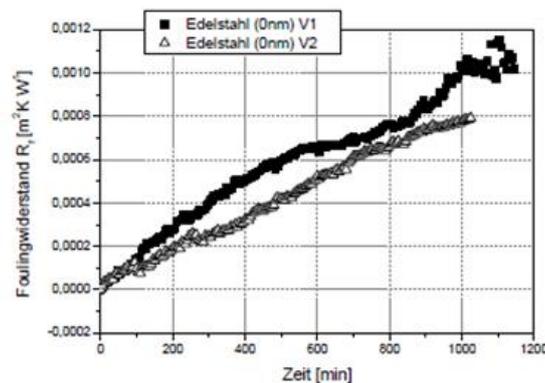
³ Die Komplexität einer Oberfläche wird über das Aspektverhältnis beschrieben. Diese Maßzahl bezeichnet das Verhältnis zwischen der Tiefe eines Strukturelements auf einem Bauteil und der Breite der Zugangsöffnung. Für ein ebenes Band ist das Aspektverhältnis 0, ein Rohr mit 10 m Länge und 10 mm Innendurchmesser hat ein Aspektverhältnis von 1.000. Technische Bauteile weisen häufig Aspektverhältnisse > 5 auf und sind damit in erster Näherung für herkömmliche Verfahren nur schwer beschichtbar.

Seit 2010 wurde bei Wieland in umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten das WICOATEC®-Beschichtungsverfahren erschlossen. Für zwei weitere wichtige Anwendungen sind bereits Kundenerprobungen erfolgreich durchgeführt worden (z. B. zum Korrosionsschutz unter thermischer Wechselbeanspruchung in der Heizungstechnik, siehe Abbildung 4, Seite 10 und 11), in anderen stehen diese kurz vor dem Abschluss (Trinkwassererwärmung), so dass der technische Reifegrad für die Beschichtung von Metallbauteilen mit dem WICOATEC®-Verfahren die Stufe *Demonstration unter Serienbedingungen* erreicht hat. Im Rahmen des Vorhabens soll nachgewiesen werden:

- Mit der WICOATEC®-Technologie können unter großtechnischen Bedingungen in der Serie Bauteile beschichtet werden.
- Die eingesetzten Verfahren heben sich durch höhere Energieeffizienz und geringere Emissionen deutlich vom Stand der Technik ab, haben insofern Vorzeigecharakter innerhalb der Branche, schaffen und sichern Arbeitsplätze in Deutschland.

Reduzierung des Fouling-Widerstands unter $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$

Unbeschichtet



Beschichtet

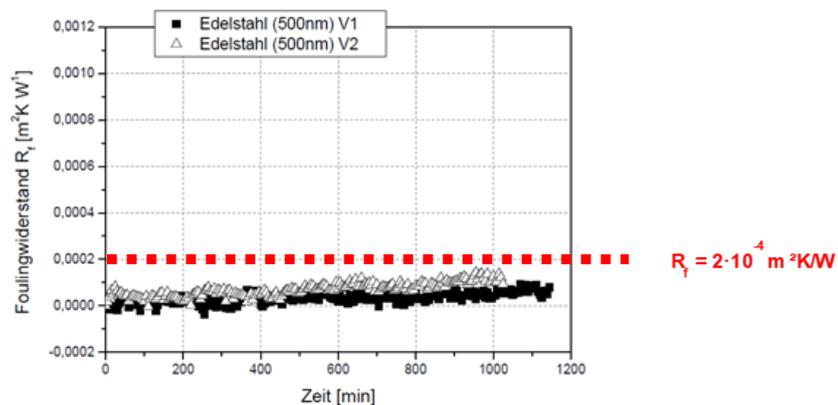


Abbildung 4

Anti-Scaling-Wirkung von WICOATEC®-Beschichtungen im Vergleich
4.1 oben: Reduzierung des Fouling-Widerstands unter $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$

Verfügbare Oberflächenfunktionalisierungen

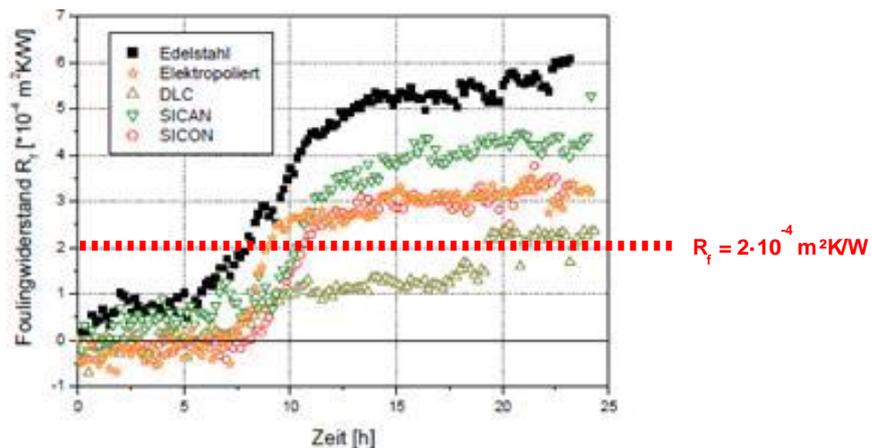


Abbildung 4

Anti-Scaling-Wirkung von WICOATEC®-Beschichtungen im Vergleich

4.2 Verfügbare Oberflächenfunktionalisierungen

2. Vorhabenumsetzung

2.1. Ziel des Vorhabens

Mit der WICOATEC®-Technologie sollen möglichst alle aktuellen technischen Herausforderungen gelöst werden, die heute zum Stand der Technik gehören. Dazu zählen insbesondere eine deutliche Reduzierung des Chemikalienverbrauchs, eine Erhöhung der Abscheideraten und Verringerung des Energieverbrauchs für die thermische Abgasbehandlung.

Der Hauptgedanke liegt darin, dass in dem Forschungsvorhaben vom single pass-Konzept zu einem rückvermischten System⁴ - oder auch Mehrfach-Pass-Konzept genannt – übergegangen werden soll.

Die Prozessgase zur Beschichtung werden also nicht nur einmalig über die Bauteile geleitet, sondern bleiben in einem vollständig rückvermischten Reaktor länger im Kontakt mit den Oberflächen zur Beschichtung. Dieser Ansatz wurde im Labor- und Pilotmaßstab erfolgreich umgesetzt, steigert die Abscheideraten von < 10 auf 30 bis 100 nm/h, reduziert den Chemikalienverbrauch signifikant und daran gekoppelt auch den Aufwand für die thermische Abgasbehandlung. Eine großtechnische Umsetzung soll im Rahmen des beantragten Vorhabens erfolgen.

Energie- und Massenbilanzen rund um die Beschichtungskammer wurden mit der Nomenklatur in Abbildung 5 aufgesetzt. Im Zentrum steht die Beschichtungskammer, deren Gesamtvolumen sich aus vier Teilvolumina zusammensetzt. Das eigentliche Beschichtungsvolumen zur Aufnahme der Bauteile

⁴ Merkel, T. et al.: Process for Depositing Ceramic or Organoceramic Material on a Substrate (US 9,169,552 // 27.10.2015)

V1, einer Einströmzone V2 und einer Ausströmzone V3. Im Falle einer Rückvermischung mit Umwälzgebläse kommt noch das Volumen der Bypass-Leitung V4 hinzu. Das Beschichtungsvolumen V1 wird über seinen Querschnitt A gleichmäßig mit einer Gasströmung (Strömungsgeschwindigkeit u) beaufschlagt. Die Betriebstemperatur T_1 liegt typischerweise um 300°C . Die Verweilzeit berechnet sich aus dem Gasdurchsatz und dem Gesamtvolumen. Es stellen sich Partialdrücke verschiedener gasförmiger Stoffe ein.

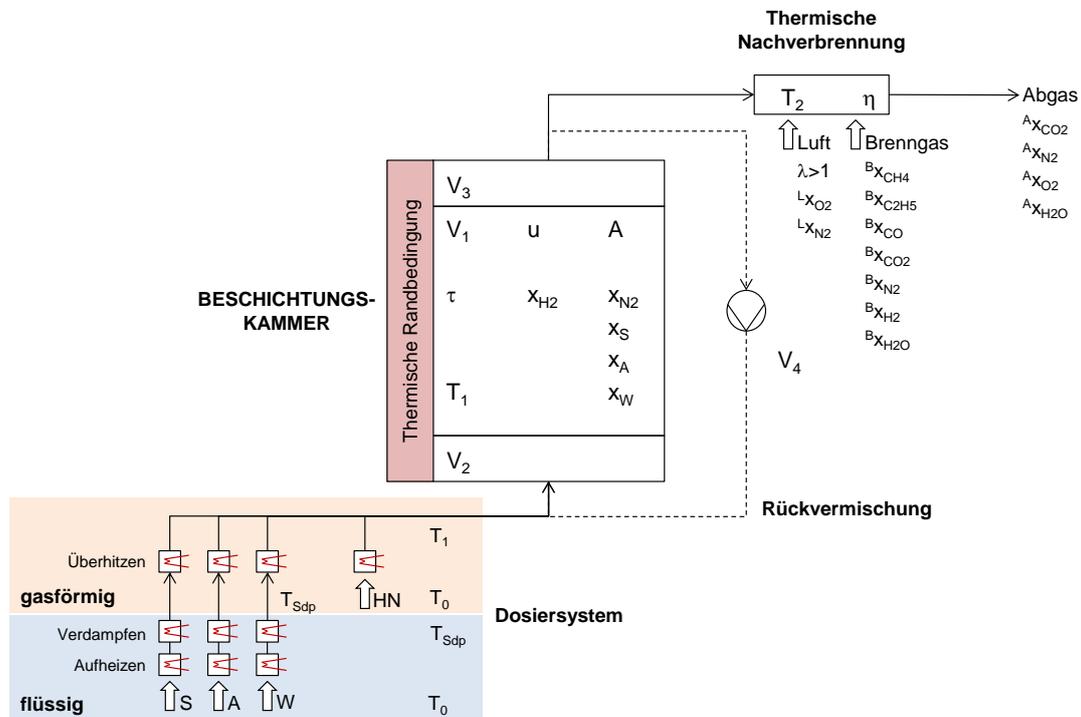


Abbildung 5

Beschichtungsanlage WICOATEC®-Prozess: Blockscha zur Massen- und Energiebilanz

Diese Stoffe werden über ein Dosiersystem bereitgestellt. Als Trägergas HN dient eine Mischung aus Stickstoff und Wasserstoff, außerdem werden drei flüssige Stoffe zunächst aufgeheizt, dann verdampft und schließlich auf die Prozesstemperatur T_1 überhitzt. Bei den flüssigen Precursoren handelt es sich um Silane (S), Essigsäure (A) und Wasser (W).

Das Ofengas wird verweilzeitabhängig ausgetragen, mit Brenngas (Erdgas L) und Luft vermischt und verbrannt. Zur vollständigen Oxidation der brennbaren Bestandteile wird Luft im Überschuss (Luftzahl $\lambda > 1$) zugemischt. Das Abgas nach der Verbrennung besteht dann nur noch aus Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid. Um eine vollständige Verbrennung zu erreichen, muss die niedrigste Temperatur im Abgas oberhalb eines kritischen Wertes T_2 liegen. Die thermische Nachverbrennung hat einen Wirkungsgrad $\eta < 1$, der von der Bauart des Brenners und der Ausführung der Brennkammer abhängt.

Für die Berechnung wurde eine Tabellenkalkulation erstellt, mit der auf der Basis prozessrelevanter Eingabegrößen (Input in Abbildung 6, links) die Energiebedarfe für das Erhitzen, Verdampfen und Überhitzen der Prozesschemie im Dosiersystem und für die Erwärmung der Abgase auf

Zieltemperatur (Output in Abbildung 6, rechts) ermittelt werden. Für die Bewertung der Energieeffizienz werden im ersten Ansatz der Brenngasverbrauch für die thermische Nachverbrennung und der Chemikalienbedarf herangezogen.

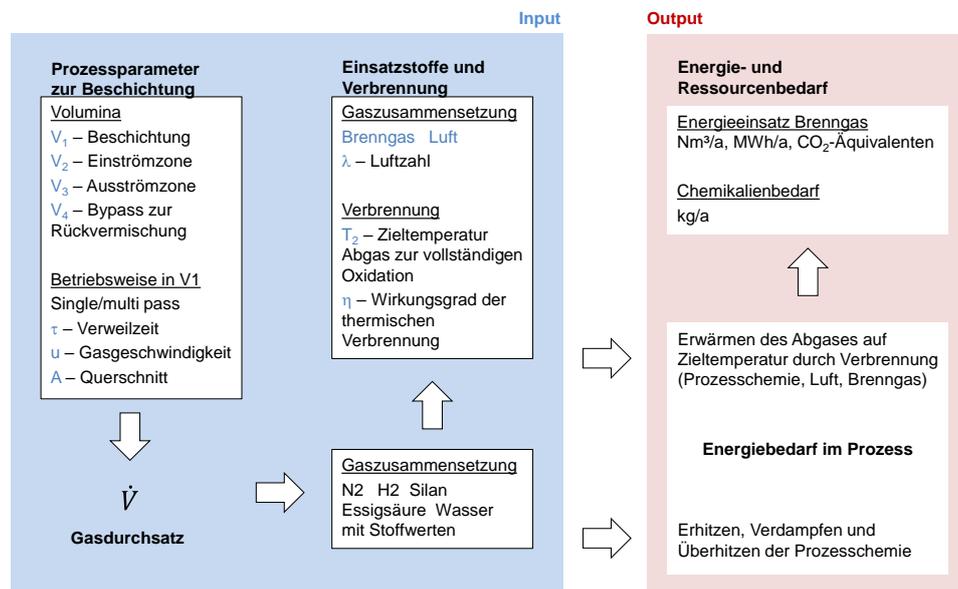


Abbildung 6
Blockschema zur Ermittlung des Energie- und Chemikalienbedarfs im WICOATEC®-Prozess

Die Massen- und Energiebilanzen bilden die Grundlage für die nachfolgend zusammengefassten Berechnungen. Die Verbesserung der Energieeffizienz berechnet sich dabei aus dem Vergleich zwischen dem in der Patentliteratur niedergelegten Stand der Technik (Siehe Abbildung 1, Seite 8) zum Verfahrenspatent, das dem WICOATEC®-Prozess zugrunde liegt. Technisch geht es um die Frage, ob das Prozessgas einmalig über die Bauteile geleitet wird (single pass) oder durch vollständige Rückvermischung länger in der Beschichtungskammer verbleibt (Mehrfach Pass).

Die Berechnungen haben gezeigt, dass das Gesamtsystem hochdynamisch ist, d.h. sehr empfindlich auf einzelne Parameter reagiert. Während sich das Anlagenvolumen linear auf Chemikalienverbrauch und Brenngasbedarf auswirken, besteht zwischen der Verweilzeit und dem Brenngasbedarf ein quadratischer Zusammenhang. Besonderes Augenmerk verlangt die Dimensionierung und Betriebsweise der thermischen Nachverbrennung: der Zusammenhang zwischen Luftzahl, thermische Wirkungsgrad, Verbrennungstemperatur und Brenngasbedarf wird empirisch über exponentielle Beziehungen beschrieben. Da auch bei möglichen Lieferanten derartiger Aggregate keine Erfahrungswerte für die Verbrennung unserer Ofengase vorliegen, verbleibt eine größere Unschärfe in der Vorhersagegenauigkeit zu den erzielbaren Einsparpotenzialen (Brenngas und Chemikalien).

In den Wirkbädern der Vorbehandlungsanlage kommen Prozesschemikalien zum Einsatz, die sowohl an die Handhabung als auch an die Entsorgung keine außergewöhnlichen Anforderungen stellen. Mit Ausnahme der Tenside in der Entfettung sind die Wirkkomponenten in der Wassergefährdungsklasse

1 eingestuft. Die Entfettung besteht aus einem phosphat-basierten Buildersystem und einem Ethoxylat-basierten Tensid und ist pH-neutral. In der alkalischen Aluminium-Beize kommen 5% Natronlauge und ein Steinverhinderer (Gluconat) zum Einsatz. Die Dekapierbäder basieren auf Mineralsäuren (niedriglegierte AlMgSi-Legierungen: Salpetersäure; Alu-Druckguss-Legierungen: Schwefelsäure mit Fluoridzusätzen im Konzentrationsbereich mg/L).

Die Entfernung der organischen (z. B. CSB-Frachten) und anorganischen Wirkkomponenten (z. B. Aluminium) wurde in Vorversuchen bei der Abwasserbehandlung über Vakuumverdampfertechnik mehrfach sicher nachgewiesen.

Als Kenngröße für den Zielwert wurde für die Untersuchung des Umwelteffekts für die Vakuumverdampfertechnologie die maximal zulässige Aluminiumbelastung für das Abwasser definiert.

Anfang 2016 war geplant, leichtflüchtige Komponenten und schwer abbaubare organische Zusätze für die Passivierung der Oberflächen einzusetzen. Da diese Stoffe aber nur schlecht aus dem Abwasser entfernt werden können, wurde der Gesamtprozess der Vorbehandlung in Kombination mit der Standzeit der gereinigten Teile vor der Beschichtung noch einmal optimiert. Danach kann auf diese Stoffe (Isopropanol und Benzotriazol) dauerhaft verzichtet werden. Organosilan-Verbindungen kommen in der Vorbehandlung nicht zum Einsatz. Sie können daher weder über die Wirkbäder noch über das Abwasser in die aquatische Umwelt gelangen. Diese Substanzen bilden allerdings als sogenannte Precursoren das Rückgrat der Beschichtungsverfahren und werden als organische Bestandteile des Prozessabgases in der thermischen Nachverbrennung bei 850°C vollständig verbrannt und entfernt. Hierbei entstehende Stäube werden nach der Verbrennung über Filter abgeschieden. Dieses Konzept ist in den bestehenden Pilotanlagen installiert und bewährt.

Entlang der WICOATEC®-Prozesskette lassen sich folgende Ansätze für eine erhebliche Umweltentlastung definieren (alle Beispiele gerechnet an Aluminium Bauteilen, mit einem jährlichen Prozessdurchsatz von 400 t pro Beschichtungsanlage für insgesamt 9 Beschichtungsanlagen):

Zur Definition der Ziele des Vorhabens dient ein Vergleich zwischen dem innovativen WICOATEC®-Verfahren und dem Stand der Technik (Hochtemperatur (HT) CVD Verfahren).

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Zugrunde liegen folgende Parameter für die Ziele:

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	WICOATEC® Verfahren	HT CVD Verfahren
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	t/a	44,6	389
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	t/a	52,8	438
3	Maximale Aluminium Belastung im Abwasser	t/a	0,35	1,80
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	MWh/a	30	162
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	MWh/a	345	4.637

Gerechnet für 3.600 t/a an Aluminiumteilen

Tabelle 1:

Zusammenfassung der Umweltentlastungspotentiale des WICOATEC-Verfahrens im Vergleich zum Stand der Technik (Hochtemperatur CVD-Verfahren)

Zum Thema der Umweltauswirkungen und zum Energieverbrauch von Oberflächenbehandlungsverfahren sind einige Quellen bekannt (siehe Anhang 6, Seite 43).

Allerdings ist mit diesen Quellen nicht möglich die Ziel-Werte für dieses Vorhaben direkt abzuleiten.

Damit wird der hoch innovative Charakter dieses Forschungsvorhabens unterstrichen. Die Ziel-Werte werden daher auf Basis theoretischer Überlegungen abgeleitet.

Diese basieren auf dem Temperaturunterschied zwischen dem WICOATEC®-Verfahren (ca. 350°C) im Vergleich zu HT CVD-Verfahren (> 900°C).

Das ergibt für eine erste Grobbetrachtung folgende Umrechnungsfaktoren vom WICOATEC®-Verfahren zum Stand der Technik (HT CVD Verfahren):

- Für Stromverbrauch bei Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien:
Faktor 3 für den Stromverbrauch
- Für Gasverbrauch zur thermischen Nachverbrennung:
Faktor 5 für den Gasverbrauch

Die in der Spalte WICOATEC®-Verfahren aufgeführten Werte werden errechnet, in dem die Ziele für die Vorhabenbeschreibung (siehe Tabelle 2, Seite 16) mit der jährlichen Produktion in Höhe von 3.600

BMU-Umweltinnovationsprogramm

t/a multipliziert werden. Der Vergleich zwischen den WICOATEC-Zielwerten und den HT-CVD Verfahren ist größer 80%.

Aufgrund des innovativen Konzeptes des WICOATEC®-Verfahrens, gekennzeichnet durch einen Mehrfach-Pass der Beschichtungschemikalien über die zu beschichteten Aluminiumbauteile, sollen erhebliche Energetische- und Umweltpotentiale freigesetzt werden.

Weitere positive Umwelteffekte durch Maßnahmen zur Reduktion der Wärmeverluste an der Beschichtungsanlage, zur Wärmerückgewinnung aus den heißen Abgasen der thermischen Nachverbrennung sowie zur vollständigen Vermeidung von Prozessabwasser aus der Beschichtung (Festbettsäule ersetzt Wassersäule zur Druckhaltung an der Beschichtungskammer) sind in dieser Aufstellung nicht berücksichtigt.

Die Umweltentlastungspotentiale sind zwar nicht Ziel des Vorhabens, werden aber im Abschlussbericht vollständigshalber dargestellt. Die Anlagen werden hierzu mit Messgeräten zur Erfassung des Energie- und Medienverbrauchs ausgestattet. Die Daten werden in Systemen zur Prozessdatenerfassung (PDA) gesammelt und zur Auswertung bereitgestellt.

Die Ziele für das Vorhaben wurden im Vorfeld mit dem Umweltbundesamt abgestimmt. Die folgende Tabelle zeigt die Übersicht mit den Zielvorgaben für das Demonstrationsvorhaben:

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	Ziel Wert
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	kg/t	12,4
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	kg/t	14,7
3	Maximale Aluminium-Belastung im Abwasser	kg/t	0,10
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	kWh/t	8,3
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	kWh/t	95,8

Tabelle 2
Aufstellung der abgeleiteten Projektziele für das WICOATEC Vorhaben

2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Im Labor- und Technikums Maßstab standen Vorbehandlungs- und Beschichtungsanlagen zur Verfügung (Auflistung siehe unten), an denen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt und Produktionserfahrungen im Rahmen von Kleinserienaufträgen gesammelt wurden. Auf dieser

Basis entstanden die Anforderungen und Spezifikationen, die den Planungen für die großtechnische Umsetzung (Demonstrationscharakter) zugrunde liegen.

Anlagengruppe 1: Bauteil-Vorbehandlung

Laborvorbehandlung (120 L) VV1 - manueller Betrieb (2 Wirkbäder, 2 Spülen)

Pilotanlage zur Bauteilvorbehandlung (250 L) BV1 - automatisierter Betrieb (3 Wirkbäder, 7 Spülen)

Technikums Anlage zur Bauteilvorbehandlung (60 L) VV2 - manueller Betrieb mit Bad Folge und Wirkbadzusammensetzung wie in Großserienanlage (10 Wirkbäder, 5 Spülen)

Angemeldete Schutzrechte

Schichtpatent angemeldet (WO 2015/131980 A1 // 11.09.2015)

Anlagengruppe 2: Bauteil-Beschichtung

Laborofen (30 L), Musterofen (220 L), Pilotofen (600 L)

Erteilte Patente

- Verfahrenspatent in den USA (US 9,169,552 B2 // 27.10.2015)
- Beschichtetes Lagersystem (DE 10 2013 004 151 B4 // 26.11.2015)
- Verfahrenspatent Europa (EP 2 473 649 B1 // 06.05.2020)

Angemeldete Schutzrechte

- Schichtpatent angemeldet (WO 2015/131980 A1 // 11.09.2015)
- Eingetragene Marke: WICOATEC® (DE 30 2015 060 097 // 9.12.2015)

Um Erfahrungswerte und Konzepte für eine großtechnische Verdichtung zu erreichen, wurden temporäre Versuchsaufbauten im Laborofen realisiert, um insbesondere die Erreichbarkeit der umwelttechnischen Ziele grundsätzlich zu verifizieren: Prüfstand zur Auswahl von Förderpumpen für die Dosierung der Beschichtungsprecursoren und Nutzung für verschiedene Pumpentypen (Kolbenmembran, Membran, Zahnrad, Schlauch, Mikro Zahnring).

- Einsträngiger Dosieraufbau (Trägergas, Beschichtungsprecursor, SPS-Steuerung)
- 1:1-Modell des Beschichtungsvolumens der geplanten Beschichtungsanlage BA1 zur Wirkung von Leitblechen und Einbauten auf die Strömungsgleichverteilung mit Kaltgas

Mit Dienstleistern und potenziellen Lieferanten wurden folgende Untersuchungen und Vorarbeiten zur Sicherung der umwelttechnischen Ziele durchgeführt:

- Trocknungsversuche zur Eignung energieeffizienter Niedertemperatur-Absorptionstrockner in der Vorbehandlungsanlage
- Numerische Strömungssimulationen zur Wirkung von Leitblechen und Einbauten auf die Strömungsgleichverteilung in der Beschichtungsanlage BA1 - Verifizierung der Kaltgasversuche und Extrapolation der Ergebnisse auf die Prozessbedingungen

- Numerische Strömungssimulationen zum Design des Verdampferrohrs im Strömungskanal
- Vorkonstruktion "modularer Kompaktofen" zur Bewertung der energetischen und technischen Realisierbarkeit der Beschichtungsanlage Bauart BA1

Mit diesen Untersuchungen sind die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Prozessentwicklung beendet. Sowohl das Bauteil Vorbehandlung als auch das Bauteil Beschichtung werden nach folgenden Kriterien geplant und ausgelegt:

Anlagengruppe 1: Bauteil-Vorbehandlung

- Vorbehandlung: Parallele Bearbeitung von Bauteilen aus Aluminium, Aluminium-Guss, Kupfer und Stahl mit ca. 70 Wareenträger/Tag, Standfläche ca. 300 m² und einer Jahreskapazität von ca. 17.500 Wareenträgern (ca. 4.000 t/a)
- Wasseraufbereitung: Kapazität ca. 50 m³/Tag bei Dauerbetrieb, Standfläche ca. 200 m²
- Abwasseraufbereitung: Kapazität ca. 6 m³/Tag, Standfläche ca. 400 m²

Anlagengruppe 2: Bauteil-Beschichtung

Beschichtungsanlage 1 (BA1): Beschichtung von Bauteilen aus Aluminium, Aluminium-Guss, Kupfer und Stahl mit ca. 6 Wareenträgern/Tag, Standfläche ca. 100 m² mit einer Jahreskapazität von ca. 1.500 Wareenträgern (ca. 400 t/a) im Zweischichtbetrieb.

Die Beschichtungsanlage BA1 wurde als modulare Kompaktanlage realisiert. Hauptmerkmal ist die konsequente Trennung der verfahrenstechnischen Grundoperationen (Heizen, Umwälzen, Mischen, Chemiedosierung etc.), so dass die zugehörigen Parameter im Rahmen der Inbetriebnahme weitgehend unabhängig voneinander variiert werden können. Diese hohe Flexibilität ist Voraussetzung für die erfolgreiche und in überschaubaren Zeiträumen realisierbare großtechnische Umsetzung des WICOATEC®-Verfahrens.

2.3. Umsetzung des Vorhabens

Gegenstand des Verfahrenspatents ist die Rückvermischung der Prozesschemie im Beschichtungsvolumen, d.h. das Gasgemisch zur Beschichtung wird umgewälzt und durch langsame Zugabe von Frischgas kontinuierlich und kontrolliert ausgetauscht. Hierdurch verbessern sich nicht nur die Produkteigenschaften, sondern es reduziert sich auch der Chemikalienverbrauch auf weniger als ein Drittel. Die Kopplung von thermischer Nachverbrennung und Filtration der Prozessabgase minimiert Emissionen brennbarer und umweltrelevanter Stoffe und soll konsequent in die Sicherheitsarchitektur der Beschichtungsanlage und der Gebäudetechnik eingebunden werden.

Anlagentechnik zur Beschichtung

Die im Vorhaben umgesetzte Beschichtungsanlage beruht auf Eigenentwicklungen, die im Rahmen des Vorhabens erstmals in den großtechnischen Maßstab übertragen wurden. Die besonderen

Eigenschaften des Beschichtungsprozesses (niedrige Prozesstemperatur, lange Beschichtungszeiten, gleichmäßige Beschichtung komplexer Oberflächen und Innenoberflächen) führen zu besonderen Anforderungen an die Anlagentechnik (siehe Abbildung 7). Die Beschichtungsschemie ist sehr reaktiv und kondensiert auf kalten Flächen. In der Beschichtungsanlage müssen deshalb annähernd isotherme Bedingungen herrschen (Prozesstemperatur +/- 10°C), während gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeiten an den Bauteilen mit 0,1 bis 0,2 m/s sehr niedrig und gleichmäßig sein müssen. In der eigentlichen Beschichtungskammer sollen auf Grundlage von Vorversuchen in einem 1:1-Strömungsmodell und CFD-Simulationen Einbauten zum Einsatz kommen, die in ähnlicher Bauart als sogenannte Niedrigimpuls-Quellauslässe in der Raumluftechnik etabliert sind, bisher allerdings noch nicht in der industriellen Thermoprozesstechnik zum Einsatz kommen.

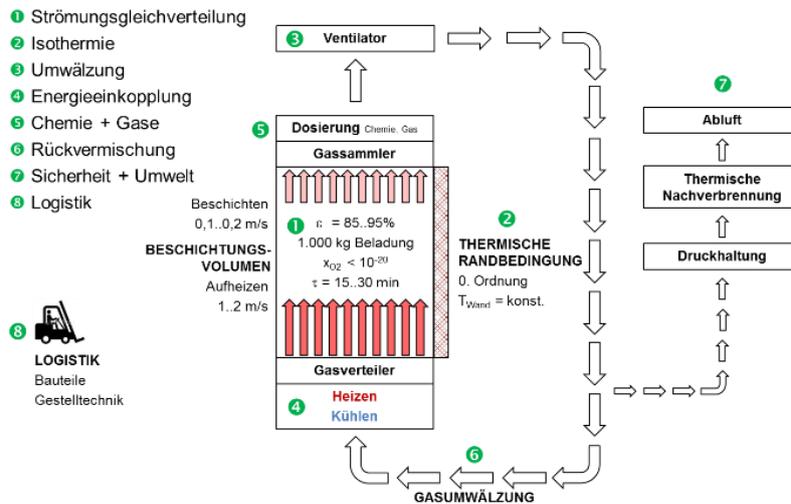


Abbildung 7:
Schematische Darstellung zu den verfahrenstechnischen Operationen in der Beschichtungsanlage BA1

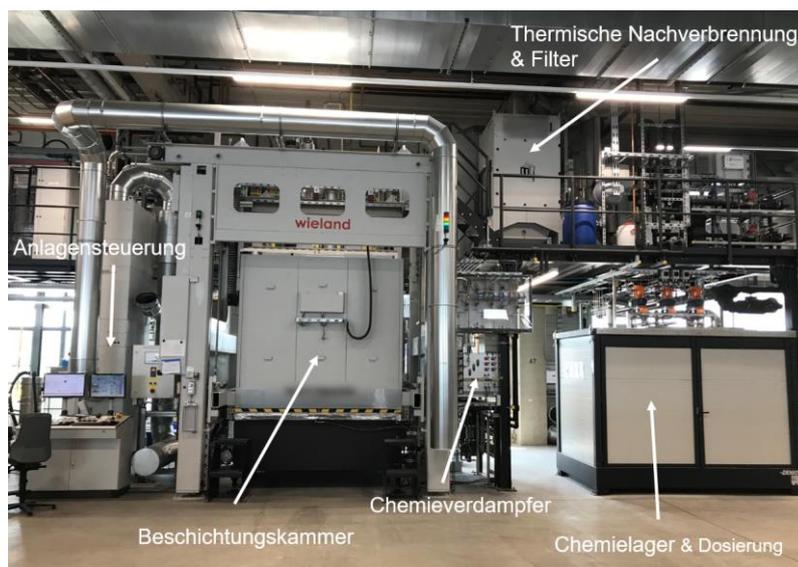


Abbildung 8:
Vorderansicht der Beschichtungsanlage BA1

Die Anlagentechnik der WICOATEC Beschichtungsanlage BA1 ist modular aufgebaut, und setzt sich aus vier Teilbereichen zusammen. Peripherieanlagenteile wie die Zuführung von Gas und Chemie, die Beschichtungskammer selbst, Abgasstrang und Nachbehandlung des Abgases sowie die übergeordnete Steuerung der Gesamtanlage.

Aufgrund des Prototypen-Status der BA1 wurde auf eine stark platzoptimierte Aufstellung verzichtet, so dass alle Baugruppen der Anlage zugänglich bleiben, und auch nach Inbetriebnahme noch optimiert werden können.

Übergeordnete Steuerung BA1

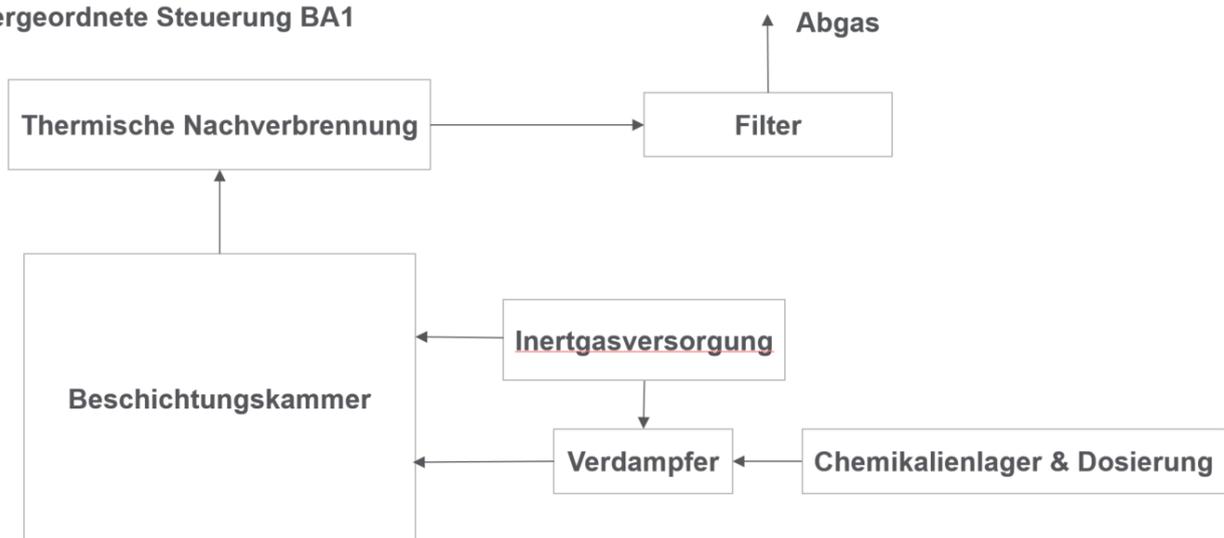


Abbildung 9: Verfahrensschema BA1

Im Zentrum der Anlage stehend, wird in der Beschichtungskammer die zu beschichtende Ware zunächst auf Beschichtungstemperatur erwärmt und dann beschichtet. Der diskontinuierliche Beschichtungsprozess stellt an die Beschichtungskammer sowohl die Anforderung geringer und gleichmäßiger Strömungsbedingungen als auch – um eine veränderte Reaktionskinetik und Kondensationseffekte zu verhindern – eine hohe Anforderung an die isotherme Prozessführung. Dies stellt an herkömmliche Ofentechnik widersprüchliche Anforderungen dar, da über die geringe konvektive Luftströmung an den Wänden der Beschichtungskammer nicht genug Energie zur Verfügung steht um die Wände zuverlässig auf Temperatur des Beschichtungsgases zu halten. Gelöst wurde das Problem durch eine innovative Wandheizung.

Das für die Beschichtung benötigte reaktive Gasgemisch setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die alle bei Raumtemperatur flüssig vorliegen. Gelagert werden die Chemikalien in einem Chemieschrank neben der Beschichtungskammer. Um die isotherme Prozessführung nicht zu gefährden, werden alle Chemikalien vor Eintritt in die Beschichtungskammer in einem elektrischen Verdampfer verdampft und auf Beschichtungstemperatur erhitzt. Ebenfalls noch außerhalb der

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Beschichtungskammer erfolgt die Mischung mit Inertgas, um die Zielkonzentration der verschiedenen Komponenten zu erreichen.

Da während dem Beschichtungsprozess kontinuierlich Chemie zu dosiert wird, fällt auch kontinuierlich Abgas an. Das „verbrauchte“ Beschichtungsgas enthält sowohl Reaktionsprodukte als auch Reste noch nicht abreagierter chemischer Bestandteile. Das Abgas wird daher in einer Gas befeuerten thermischen Nachverbrennung verbrannt, über einen Filter geleitet und abschließend über einen Kamin abgegeben.

2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Für den Betrieb der Wieland Wicoatec Anlagen wurde beim zuständigen Landratsamt Neu-Ulm am 03.08.2017 ein Änderungsantrag auf „Änderung der Erlaubnis für das Zutagefördern von Grundwasser sowie das Einleiten von Kühlwasser und Niederschlagwasser in den Illerkanal im Werk Vöhringen der Firma Wieland-Werke“ gestellt. Die Erlaubnis dazu wurde nach WB1-EH (Anhang 31 AbwV) bzw. nach WB1-AB (Anhang 40 AbwV) vom zuständigen Landratsamt Neu-Ulm am 13.09.2017 erteilt.

2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Für das Fördervorhaben wurden alle definierten Verbräuche mitgeschrieben und in der Zentralen Leittechnik (ZLT) und in der Betriebsdatenerfassung (BDE) in der Anlagensteuerung und Visualisierung protokolliert. Ausgewertet wurden die Daten der einzelnen Zähler in einer Excel-Datei.

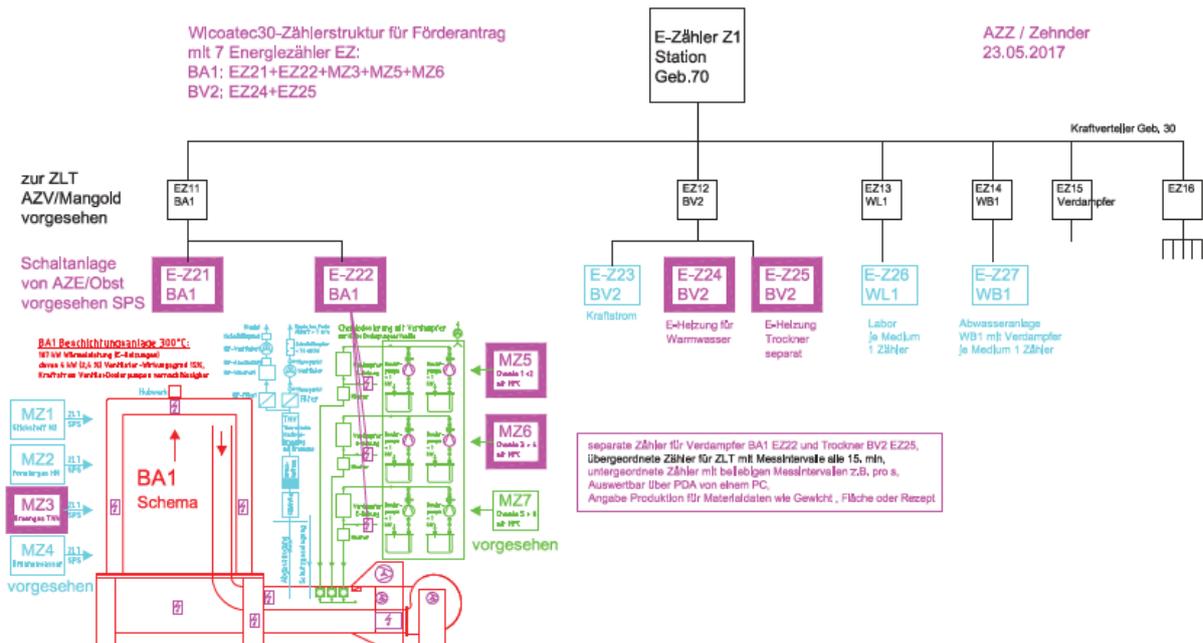


Abbildung 10
Prinzipskizze: Zähleraufbau für das Fördervorhaben Wicoatec

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Dies waren im Einzelnen:

- Ziel 1: Maximaler Chemikalienverbrauch BA1 Silane (TMOS) in I (Zähler MZ6)
- Ziel 2: Maximaler Chemikalienverbrauch BA1 Essigsäure (Hac) in I (Zähler MZ5)
- Ziel 3: Maximale Aluminiumbelastung im Abwasser in kg/l (Probenentnahme wöchentlich)
- Ziel 4: Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien in kWh (Zähler EZ22)
- Ziel 5: Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen in kWh (Zähler MZ3)

2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms

BA1															
Soll Heizung Beschichtung [kWh/t]	Ist Heizung Prozesschemikalien [Wh]	Ist Heizung Prozesschemikalien [kWh/t]	Soll Heizung Prozesschemikalien [kWh/t]	Ist Thermische Nachverbrennung Brenngas [kWh]	Ist Thermische Nachverbrennung Brenngas [kWh/t]	Soll Thermische Nachverbrennung Brenngas [kWh/t]	Ist Chemikalienverbrauch Essigsäure [l]	Ist Chemikalienverbrauch Essigsäure [kg]	Soll Chemikalienverbrauch Essigsäure [kg/t]	Soll Chemikalienverbrauch Essigsäure [kg/t]	Ist Chemikalienverbrauch Silane [l]	Ist Chemikalienverbrauch Silane [kg]	Soll Chemikalienverbrauch Silane [kg/t]	Soll Chemikalienverbrauch Silane [kg/t]	Status_Fertigung
BV2										Abwasser in den Kanal					
Gewicht der Ware 3600t/250Tage =14,4t/Tag (t/Tag)		Ist Badheizung (kWh) (S1224)	Ist Badheizung (kWh/t)	Soll Badheizung (kWh/t)	Ist Teiletrocknung (kWh) (S1223)	Ist Teiletrocknung (kWh/t)	Soll Teiletrocknung (kWh/t)	Ist Aluminiumgehalt Abwasser (kg/t)	Soll Aluminiumgehalt Abwasser (kg/t)						

Abbildung 11
Übersicht der dokumentierten Daten / Verbräuche

Die Auswertung dieser Daten und Identifikation der Verbesserungspotentiale bzw. Optimierungsmöglichkeiten erfolgten im Zeitfenster Ende November 2019 / Ende Dezember 2019. Dazu wurden die Daten der 5 definierten Zielverbräuche jeweils mit den Sollwerten in einer zusammenfassenden Tabelle unterschieden in BA1 (Beschichtungsanlage 1), BV2 (Vorbehandlungsanlage 2) und WB1 (Wasseraufbereitungsanlage 1).

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung

Die Planung, Bestellung, Montage und Inbetriebnahme aller Anlagen und Anlagenteile verlief im normalen zeitlichen Rahmen. Ab dem Januar 2019 wurden die ersten Probetrieb-Einfahrversuche am Beschichtungssofen BA1 durchgeführt. Da zwar die Anlagenverfügbarkeit zufriedenstellend war, aber noch an der Qualität der Produkte (Schichtdicke, Schichtdickenverteilung) optimiert werden musste, wurden die ersten Bemusterungen in Absprache mit dem Kunden auf April 2019 verschoben. Die weiteren Nullserien-Bemusterungen in Realanwendung waren im Juni 2019 erfolgreich und der Kunde erteilte somit die Serienfreigabe für die Anlagen BA1, BV2 und WB1.

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Die Beschichtungsanlage (BA1), die Vorbehandlung (BV2) und die Wassertechnik (WB1) sind aktuell voll einsatzbereit und werden unter Serienbedingungen im Einschicht- bzw. Zweischichtbetrieb verwendet. Da ein Großkunde im Juni 2019 nach der Freigabe des Prozesses seine Bestellungen um 100% gesteigert hatte, waren anschließend praxisrelevante und aussagekräftige Ergebnisse unter Serienbedingungen gegeben.

3.2. Stoff- und Energiebilanz

1. Vergleich mit dem aktuellen Stand der Technik

Nachfolgend sind die umwelttechnischen Vorhabenziele aus der Tabelle 1, für eine Vergleichsproduktion von 3.600 t/a hochgerechnet, mit den Vergleichswerten des aktuellen Stand der Technik (HT CVD-Verfahren, Tabelle 1, Seite 14) dargestellt. Die CO₂-Emissionen können somit für die bei den Vergleichsvarianten verglichen werden.

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	WICOATEC® Verfahren	HT CVD Verfahren	Abweichung %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	t CO ₂ /a	51,3	447	-89%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	t CO ₂ /a	77,6	644	-88%
3	Maximale Aluminium-Belastung im Abwasser	t CO ₂ /a	0,0	0	0%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	t CO ₂ /a	15,5	84	-82%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	t CO ₂ /a	83,5	1.112	-92%
	Summe	t CO ₂ /a	227,9	2.287	-90%

Tabelle 3

Umwelttechnischer Vergleich der Ziele des WICOATEC®-Verfahrens mit den entsprechenden Werten für das Hochtemperatur CVD Verfahren

Mit dem WICOATEC Demonstrationsvorhaben soll das anspruchsvolle Ziel verfolgt werden im Vergleich zu dem HT CVD-Verfahren die CO₂-Emissionen um mind. 90% zu verringern.

2. Vergleich zwischen ursprünglich definierten Zielen und den ermittelten Ergebnissen nach Projektumsetzung

In den Diagrammen ist der Zielwert, gemäß der Abstimmung mit dem Umweltbundesamt zum Stand der Technik, jeweils links als blaue Säule dargestellt. Die zweite Säule zeigt die im Rahmen des Vorhabens ermittelten Ist-Werte für den jeweiligen Zielparameter – dabei wird farblich unterschieden, ob das Ziel erreicht (grün) oder verfehlt wurde (rot). Weitere Säulen stellen Ergebnisse oder Erwartungswerte von Optimierungen dar. Die Farblogik wird beibehalten.

Ziel 1: Maximaler Chemikalienverbrauch BA1 Silane (TMOS)

Soll: BA1 Chemikalienverbrauch Silane < 12,4 kg/t

Ist: BA1 Chemikalienverbrauch im Mittel von **9,6 kg/t**

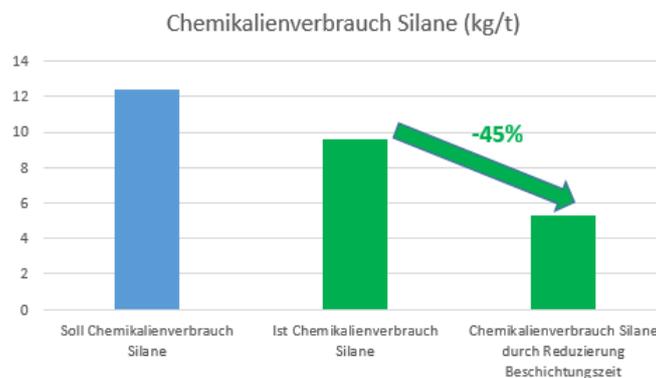


Abbildung 12

Chemikalienverbrauch Silane Beschichtungsanlage BA1 Soll-, Ist-Werte des spezifischen Chemikalienverbrauchs sowie Ergebnisse möglicher Reduzierungen

Die Verkürzung der Prozesszeit von 5,5 auf 3 Stunden führte zu einer weiteren Einsparung um 45%, so dass die Soll- Werte deutlich unterschritten werden konnten:

Soll-Wert Silane: 12,4 kg/t optimierter Ist-Wert Silane **5,3 kg/t**

Ergebnis: Der Chemikalienverbrauch Silane wurde richtig ausgelegt und die Kennzahlen befinden sich im Zielkorridor.

Ziel 2: Maximaler Chemikalienverbrauch BA1 Essigsäure (Hac)

Soll BA1 Chemikalienverbrauch Essigsäure < 14,7 kg/t

Ist BA1 Chemikalienverbrauch im Mittel von **10,9 kg/t**

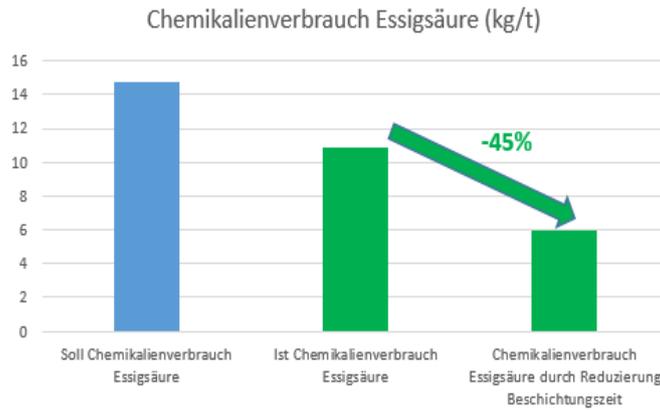


Abbildung 13
Chemikalienverbrauch Essigsäure Beschichtungsanlage BA1 Soll-, Ist-Werte des spezifischen Chemikalienverbrauchs sowie Ergebnisse möglicher Reduzierungen

Soll-Wert Essigsäure: 14,7 kg/t optimierter Ist-Wert Essigsäure **6 kg/t**

Ergebnis: Der Chemikalienverbrauch Essigsäure wurde richtig ausgelegt und die Kennzahlen befinden sich im Zielkorridor.

Ziel 3: Maximale Aluminiumbelastung im Abwasser

In der **Wasserbehandlungsanlage WB1** wird das Abwasser aus der Vorbehandlungsanlage BV2 gereinigt. Leitparameter zur Überprüfung der Wirksamkeit ist die Reduzierung des Aluminiumgehalts im Abwasser. Die Anlage funktioniert einwandfrei und der Soll-Wert wurde erreicht (Abbildung 14).

Soll Aluminiumgehalt Abwasser < 0,1 kg/t

Ist Aluminiumgehalt Abwasser < 0,0005 kg/t

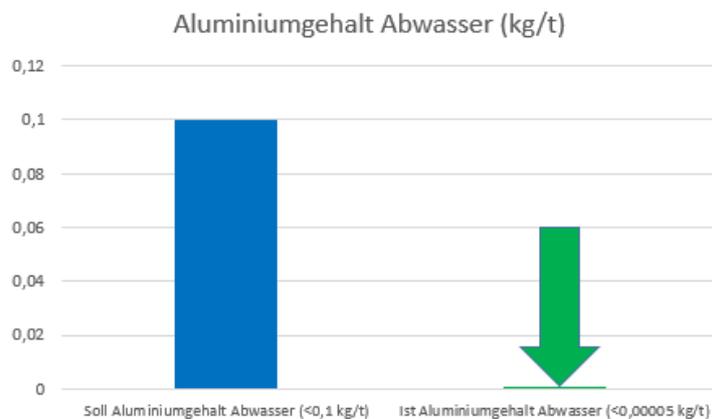


Abbildung 14
Abwasserqualität nach Wasserbehandlungsanlage WB1 spezifischer Aluminiumgehalt im Abwasser

Ergebnis: Die gemessenen Werte zum Aluminiumgehalt im Abwasser liegen im Zielkorridor.

Ziel 4: Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien

Bei der Inbetriebnahme der Beschichtungsanlage BA1 betrug die Beschichtungszeit 5,5 h. Der Ist-Wert für die Heizung der Prozesschemikalien wurde mit 8,5 kWh/t bestimmt, der Soll-Wert von 8,3 kWh/t wurde knapp verfehlt (Abbildung 15).

Ergebnis: Die Heizung Prozesschemikalien wurde richtig ausgelegt und die Kennzahlen befinden sich im Zielkorridor.

Soll Heizung Prozesschemikalien <8,3 kWh/t

Ist Heizung Prozesschemikalien im Mittel von 8,5 kWh/t

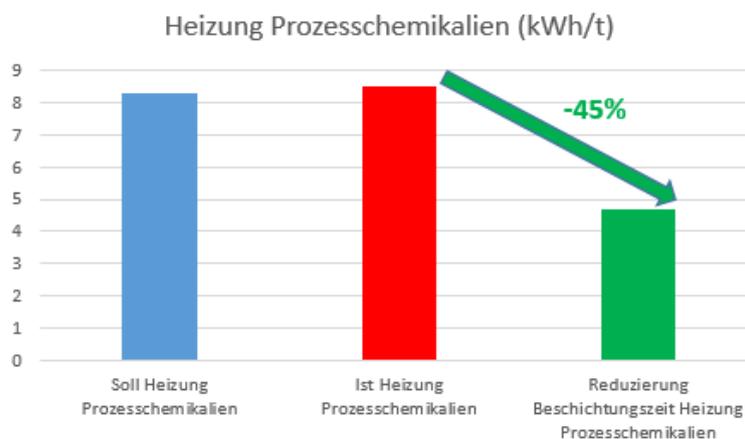


Abbildung 15

Heizung Prozesschemikalien Beschichtungsanlage BA1 Soll-, Ist-Werte des spezifischen Energieverbrauchs sowie Ergebnisse möglicher Reduzierungen

Im Zuge der weiteren Optimierungen konnte die Beschichtungszeit von 5,5 auf 3 Stunden reduziert werden. Hierdurch reduzierte sich linear die Beheizungsdauer um 45%. Entsprechend liegt der neue Ist-Wert nun bei 4,7 kWh/t und damit unter dem Soll-Wert.

Ziel 5: Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgase

Nach den ersten Versuchen den Erdgasverbrauch zu reduzieren, wurde klar, dass dieses das anspruchsvollste Ziel im Vorhaben war. Erste Werte lagen deutlich über dem Vorhabenziel Nr. 5:

Soll thermische Nachverbrennung Brenngas < 95,8 kWh/t

Ist thermische Nachverbrennung Brenngas von = 519,5 kWh/t

Die Istwerte wurden über einen Zeitraum von 6 Monaten mitgeschrieben, dokumentiert, ausgewertet und für Optimierungen herangezogen. Bei der Weiterentwicklung des Prozesses ergaben sich drei Ansätze zur Realisierung weiterer Einsparpotenziale (Siehe Abbildung 16, Seite 27).

Es wurden 3 Einsparpotentiale entwickelt:

Einsparpotenzial 1

Im Beschichtungssofen wurde im Rahmen der Inbetriebnahme zunächst 5,5 Stunden lang beschichtet. Durch eine Reduzierung der Beschichtungszeit auf 3 Stunden reduziert sich der Brenngasverbrauch in der TNV um **22%**. Ein spezifischer Energieverbrauch von **405,2 kWh/t** kann somit realisiert werden.

Einsparpotenzial 2

Bei der Inbetriebnahme wurde die TNV bereits während der Aufheizphase aktiviert. Ein Start unmittelbar zu Beginn der Beschichtung erscheint ausreichend, um das Abgas zu reinigen. Daraus resultiert eine weitere Reduktion um **24%** und bei kumulierter Realisierung der Einsparpotenziale 1 und 2 ein spezifischer Verbrauch **280,5 kWh/t**.

Einsparpotenzial 3

Der Brenngasverbrauch kann durch eine andere steuerungstechnische Verschaltung der thermischen Nachverbrennung weiter reduziert werden, d.h. zwischen aufeinanderfolgenden Ofenbeschichtungen wird die thermische Nachverbrennung abgeschaltet. Dadurch ergibt sich beim Brenngasverbrauch eine weitere Einsparung von mindestens 4,6% (kumulierter Verbrauchswert **257,6 kWh/t**). Sofern es beim Be- und Entladen zu Verzögerungen kommt, führt diese Abschaltung zu weiteren Einsparungen gegenüber dem Referenzzustand, weil der Gasverbrauch linear mit der Dauer des Chargierens korreliert.

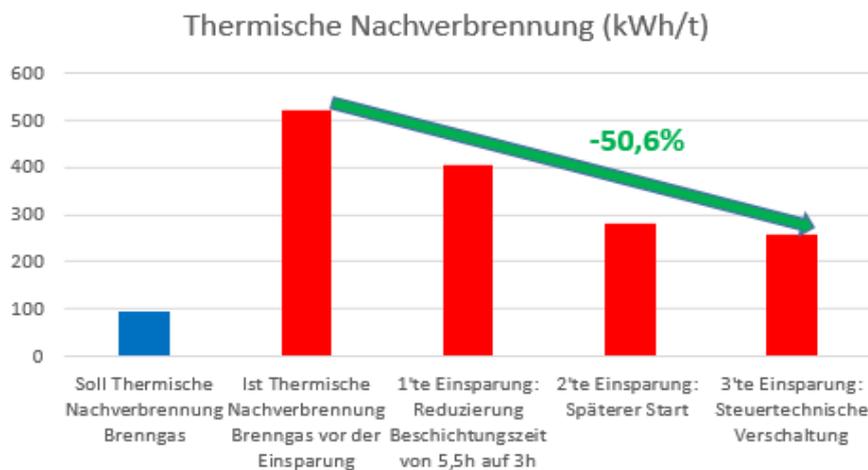


Abbildung 16
Thermische Nachverbrennung Beschichtungsanlage BA1 Soll-, Ist-Werte des spezifischen Energieverbrauchs sowie Ergebnisse möglicher Reduzierungen

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Ergebnis: Mit diesen drei weiteren Einsparungen lässt sich der Energieverbrauch um ca. **50%** reduzieren. Insgesamt reichten diese Einsparungen noch nicht aus, um das Projektziel Nr. 5 zu erreichen. Die identifizierten Potenziale werden schrittweise umgesetzt. Weitere Einsparungen werden durch die kontinuierlichen Verbesserungen erwartet, die routinemäßig gemäß PDCA-Logik (Plan, Do, Check, Act) erarbeitet und umgesetzt werden.

Eine technische Umrüstung von einem Brenner konstanter Leistung auf einen modulierenden Brenner ist zwar grundsätzlich möglich, erfordert jedoch umfangreiche Umbauten und Modifikationen an Anlagentechnik und Steuerung. Ein noch ungelöstes Problem ist der geringe Heizwert des zur Verfügung stehenden Brenngases. Dieses wird am Produktionsstandort als einsatzfähiges Gas-Luft-Gemisch zentral bereitgestellt und ist nicht ohne Weiteres für jeden Brennertyp einsetzbar. Es wird weiterhin versucht das definierte Ziel mit technischen Verbesserungen zu erreichen.

Zusammenfassung der realisierten Zielwerte:

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	Ziel Wert	Ist Wert 12/2019	Ist Wert 03/2020	Zielverbesserung %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	kg/t	12,4	9,6	5,3	57%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	kg/t	14,7	10,9	6,0	59%
3	Maximale Aluminium Belastung im Abwasser	kg Al/t	0,10	0,0005	0,0005	100%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	kWh/t	8,3	8,5	4,7	43%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	kWh/t	95,8	519,5	257,6	-169%

Tabelle 4

Zielverbesserung des WICOATEC Vorhabens in kg/t bzw. kWh/t

Bei den Zielen 1-4 liegen die Ergebnisse deutlich unter den vorgegebenen Zielwerten. Lediglich bei dem Ziel Nummer 5 müssen noch in den nächsten Monaten weitere Optimierungen in der PDCA (Plan, Do, Check, Act) –Logik erfolgen.

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	Ziel Wert	Ist Wert 12/2019	Ist Wert 03/2020	Zielverbesserung %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	t/a	44,6	34,6	19,1	57%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	t/a	52,8	39,2	21,6	59%
3	Maximale Aluminium Belastung im Abwasser	t Al/a	0,35	0,0018	0,0018	100%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	MWh/a	30	31	17	43%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	MWh/a	345	1.870	927	-169%

Tabelle 5

Ziele bezogen auf eine Vergleichsproduktion von 3.600 t/a (400 t/a x 9 Beschichtungsanlagen)

3.3. Umweltbilanz

Bei den 5 gesteckten Zielen wurden folgende umweltrelevante Ergebnisse erreicht:

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	Ziel Wert	Ist Wert 03/2020	Zielverbesserung %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	kg CO ₂ /t	14,3	6,1	57%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	kg CO ₂ /t	21,6	8,8	59%
3	Maximale Aluminium Belastung im Abwasser	kg CO ₂ /t	0,0	0,0	0%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	kg CO ₂ /t	4,3	2,4	43%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	kg CO ₂ /t	23,2	62,3	-169%

Tabelle 6

Erreichte umwelttechnische Ziele im Vergleich zu den gesetzten Vorhabenziele in kg CO₂/t Material

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	Ziel Wert	Ist Wert 03/2020	Ziel Verbesserung %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	t CO ₂ /a	51,3	21,9	57%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	t CO ₂ /a	77,6	31,7	59%
3	Maximale Aluminium Belastung im Abwasser	t CO ₂ /a	0,0	0,0	0%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	t CO ₂ /a	15,5	8,8	43%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	t CO ₂ /a	83,5	224,4	-169%
	Summe	t CO₂/a	227,9	286,8	-26%

Tabelle 7

Erreichte umwelttechnische Ziele im Vergleich zu den gesetzten Vorhabenziele in t CO₂/Jahr, für eine Vergleichsproduktion von 3.600 t/Jahr

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	WICOATEC® Verfahren	HT CVD Verfahren	Einsparpotential %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	t/a	19,1	389	-95%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	t/a	21,6	438	-95%
3	Maximale Aluminium-Belastung im Abwasser	t Al/a	0,0018	1,80	-100%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	MWh/a	17	162	-90%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	MWh/a	927	4.637	-80%

Tabelle 8

Erreichte umwelttechnische und energetische Ziele in t/Jahr bzw. MWh/a, im Vergleich zum Stand der Technik (HT CVD Verfahren), bei einer Vergleichsproduktion von 3.600 t/Jahr

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	WICOATEC® Verfahren	HT CVD Verfahren	Einspar- potential %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	t CO ₂ /a	21,9	447	-95%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	t CO ₂ /a	31,7	644	-95%
3	Maximale Aluminium-Belastung im Abwasser	t CO ₂ /a	0,0	0	0%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozesschemikalien	t CO ₂ /a	8,8	84	-90%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	t CO ₂ /a	224,4	1.112	-80%
	Summe	t CO ₂ /a	286,8	2.287	-87%

Tabelle 9

Erreichte umwelttechnische Ziele in t CO₂/Jahr, im Vergleich zum Stand der Technik (HT CVD Verfahren), für eine Vergleichsproduktion von 3.600 t/Jahr

Zusammenfassung der erreichten umwelttechnischen Zielwerte im Vergleich zum Stand der Technik (HT CVD Verfahren):

- Ressourceneinsparung durch Reduzierung des Chemikalienverbrauchs (Silane und Essigsäure)

Durch die Implementierung des Verweilzeitkonzepts wird der Chemieverbrauch in den Beschichtungsanlagen drastisch reduziert. Dadurch kann die aus Umwelt- und Sicherheitsgründen erforderliche Nachverbrennung der Abgase aus dem Beschichtungsöfen deutlich kleiner dimensioniert werden.

- Ressourceneinsparung durch Reduzierung des Metallabtrags (Aluminium)

Der Beizabtrag für die Vorbehandlung von Aluminium liegt mindestens um ein Faktor 5 unter dem Stand der Technik⁵. Das Abwasser bzw. die Abwasserbehandlung werden um 1.440 kg Aluminium/a entlastet. Durch den geplanten Einsatz der Verdampfertechnik reduzieren sich die Salzfrachten und CSB-Frachten im Abwasser um > 90%.

- Ressourceneinsparung durch Reduzierung des Energieverbrauchs (Stromverbrauch zum Aufheizen, Verdampfen und Überhitzen der Prozesschemikalien)

Durch Herabsetzung der Prozesstemperatur von 900 bis 1.050°C auf ca. 350°C und durch Einführen des Mehrfach-Pass Verfahrens, können erhebliche Stromverbräuche beim Aufheizen, Verdampfen und Überhitzen der Prozesschemikalien reduziert werden.

⁵ Aluminium-Taschenbuch, Band 2: Umformen, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling und Ökologie, Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf 1996

- Ressourceneinsparung durch Reduzierung des Energieverbrauchs (Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen)

Die Reduzierung des Chemikalieneinsatzes und das Mehrfach-Pass System bewirken ebenfalls eine deutliche Reduzierung des Energieverbrauchs bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgase.

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die innovativen Pilotanlagen für den Aufbau einer großtechnischen Umsetzung der WICOATEC®-Technologie waren mit einem Investitionsvolumen von 4,223 Mio. EUR geplant.

Die Förderung in Form des BMU-Umweltinnovationsprogramms in Höhe von 483 TEUR führte zu einer deutlichen Verringerung der technischen und wirtschaftlichen Risiken für die Beschichtungsanlage BA1. Außerdem wurde die Liquidität des Unternehmens positiv beeinflusst.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Anlagengruppen Vorbehandlung (Wasseraufbereitung – Vorbehandlung – Abwasserbehandlung) und Beschichtungsanlage BA1 im Herbst 2018 und weiteren Optimierungsmaßnahmen im Jahr 2019, beläuft sich die investierte Gesamtsumme auf 4,791 Mio. EUR.

Für die Antragstellung wurde im November 2016 eine Amortisationszeit von 5 Jahren nach Inbetriebnahme berechnet. Die Annahme setzte damals die Akzeptanz der WICOATEC-Produkte im Markt voraus.

Zwischenzeitlich ist die Serienproduktion am Standort Vöhringen angelaufen. Das schon in der Antragstellung erwähnte wirtschaftliche Risiko einer solchen innovativen Anlage lässt sich in diesem Fall deutlich erkennen. Neben ersten technischen Anlaufschwierigkeiten mit der neuen Anlagentechnik und einer dadurch verzögerten Inbetriebnahme, kamen wirtschaftliche Schwierigkeiten auf Wicoatec zu. Entgegen den ursprünglichen Annahmen war die Marktakzeptanz der Wicoatec-Produkte geringer als angenommen. Zudem wurde die Dauer der Serienfreigaben deutlich kürzer eingeschätzt als die tatsächlich von den Kunden benötigte Testzeit prognostiziert war. Dieses lag daran, dass die kundenspezifischen Beschichtungen nicht genormt und die Kundenproben deshalb individuelle und sehr umfangreiche FreigabeprozEDUREN unterlagen, verbunden mit dem Bau von Testapparaturen im WICOATEC-Labor.

Der Umsatz liegt demnach deutlich hinter den ursprünglichen Annahmen zurück. Diese geänderten Rahmenbedingungen führten im April 2020 zu der Entscheidung, vorerst keine Investitionen in weitere neue Anlagen zu tätigen. Der Fokus liegt nun verstärkt auf der Auslastung der vorhandenen Kapazitäten und dem Aufbau der nötigen Marktakzeptanz.

Die Wieland Wicoatec GmbH befindet sich momentan in einer strategischen Neuausrichtung. Ziel ist es, eine Amortisationszeit von weniger als 10 Jahren zu erreichen. Dazu wird die geplante jährliche

Beschichtungsmenge auf rund 320 t/a bzw. um 20% verringert. In den letzten Wochen wurden dazu verschiedene Maßnahmen angestoßen. Dazu zählen z. B. weitere Verringerungen der Betriebskosten und ein Ausbau des bestehenden Geschäfts.

Zudem könnten in dieser Zeit die Beschichtungs-Prozesse weiter überarbeitet und effektiver gestaltet werden. Die Wieland Wicoatec GmbH geht davon aus, dass die prognostizierten Produktions- und Umwelttechnischen Ziele erreicht werden können, benötigen aber, wie dargestellt, weitere Zeit dazu.

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Der technische Vergleich zwischen dem WICOATEC®-Verfahren und dem HT-CVD Verfahren basiert auf drei Merkmale, die die Vorteile des WICOATEC®-Verfahrens hervorheben:

- Die **Ressourceneinsparung** wird vor allem durch die niedrigere Prozesstemperatur (bei HT CVD 900°C, WICOATEC ca. 350°C), den Verzicht auf die Vakuumtechnologie und die Reduzierung der eingesetzten Chemikalien erreicht.
- Bei einer Prozesstemperatur > 900°C können verschiedene Materialien (wie zum Beispiel Aluminium, mit einer Schmelztemperatur von 660°C) nicht beschichtet werden, da das Gefüge in den beschichteten Teilen sich bei diesen Temperaturen stark verändern würde. Beim WICOATEC®-Verfahren besteht dieser Nachteil nicht.
- **Verlängerung der Lebensdauer** großer, schwerer und in der Herstellung mit großen Ressourceneinsatz herzustellender Bauteile durch die Korrosionsschutz- und Antifouling-Wirkung von WICOATEC®-Beschichtungen.

Diese drei technischen Vorteile werden an zwei Beispielen verdeutlicht:

Beispiel 1

Beschichtung großer Plattenwärmeübertrager für den Einsatz in der chemischen Industrie

Plattenwärmeübertrager werden in der chemischen Industrie in vielen Prozessstufen eingesetzt. Betrachtet werden Aggregate kupfergelöteter Plattenwärmeübertrager aus Edelstahl mit Stückgewichten zwischen 250 und 1.000 kg und äußeren Abmessungen von ca. 500 x 500 x 500 bis 1.000 x 1.000 x 500 mm. Die im Primärkreislauf eingesetzten Prozessmedien werden sekundärseitig häufig mit offenen Kühlwasserkreisläufen (Grundwasser, Oberflächenwasser) gekühlt. Abhängig von der örtlichen Wasserbeschaffenheit und den Betriebsbedingungen sind die Standzeiten dieser Bauelemente äußerst unterschiedlich. Maßnahmen zur Optimierung der Wasserqualität durch Zusatz von Additiven o.ä. kommen wegen des hohen Wasserdurchsatzes und der hieraus resultierenden umwelttechnischen Nachteilen nicht in Frage.

Im konkreten Fall ist ein Endanwender an uns herangetreten, dessen Plattenwärmeübertrager (Abmessungen ca. 500 x 500 x 500 mm; Gewicht 250 kg; Medien: Brunnenwasser gegen Wasser-Methanol-Gemische) mittlere Standzeiten von ca. 6 Monaten aufweisen. Die ersten beiden von uns beschichteten Plattenwärmeübertrager sind nun seit 1 Jahr ohne Auffälligkeiten im betrieblichen Einsatz.

Nach unseren Informationen produziert der europäische Marktführer für kupfergelötete Plattenwärmeübertrager (Marktanteil ca. 40%) täglich 160 bis 200 Einheiten mit Stückgewichten von 250 bis 1.000 kg. Davon entfallen etwa 10.000 Einheiten / Jahr auf das Geschäftsfeld chemische Industrie.

160 bis 200 Einheiten/d Annahme: Ø 180 Einheiten/d

250 bis 1.000 kg/Einheit Annahme: Ø 600 kg/Einheit

Annahme: Mindestens eine Verdoppelung der Standzeit der Plattenwärmeübertrager durch WICOATEC®-Beschichtungen

Ressourceneffizienz:

Eine jährliche Materialeinsparung bei der Herstellung von Plattenwärmeübertrager mit WICOATEC®-Beschichtungen, führt zu einer Einsparung von mindestens 9.500 t Edelstahl und 2.380 t Kupfer (80% Edelstahl, 20% Cu-Folie) durch eine verlängerte Standzeit der Teile.

Der errechnete umwelttechnische Vorteil durch den reduzierten Materialeinsatz ist wie folgt:

- 1) Materialeinsparung 9.500 t Edelstahl: Ein Global Warming Potential (GWP) von mind. 43.027 t CO₂-Äquivalente.
- 2) Materialeinsparung 2.380 t Kupfer: Ein Global Warming Potential (GWP) von mind. 2.808 t CO₂-Äquivalente.

Durch die längere Standzeit der Plattenwärmeübertrager durch WICOATEC®-Beschichtungen, lassen sich in Summe also 45.835 t CO₂-Äquivalente jährlich einsparen!

Quelle: UBA-Arbeitshilfe zur Berechnung der CO₂-Umweltäquivalenten ⁶

Einordnung

Neben dem WICOATEC®-Verfahren sind Wieland Wicoatec keine weiteren technischen Verfahren zu Innenbeschichtung derartiger Bauelemente bekannt. Der Schritt in die Felderprobung war für alle Beteiligten (Endanwender, Hersteller des Plattenwärmeübertragers, Wieland) ein Risiko, weil zu diesem Zeitpunkt keinerlei Prozessverfahren vorlagen. Aktuell ist es noch so, dass grundlegende

⁶ https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/arbeitshilfe_zur_berechnung_und_bilanzierung_2014_0.xlsx

chemisch-physikalische Prozesse rund um die Innenbeschichtung dieser Bauteile ähnlich im Dunkeln liegen wie der Oberflächenzustand der angelieferten Ware. Insofern besteht natürlich das Risiko, dass diese Bauteile zeitnah ausfallen. Die bisher erzielten Lebensdauersteigerungen (in diesem Beispiel Faktor 2) und die wiederholten Kundenbestellungen erhärten unsere Annahme, dass die WICOATEC®-Technologie in die richtige Richtung weist.

Mit den heute verfügbaren Labor- und Pilotanlagen sind eine wirtschaftliche Herstellung, ein sicheres Handling der schweren Bauteile und die Weiterentwicklung dieser vielversprechenden Technologien für die Serienherstellung jedoch nicht realisierbar.

Mit der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Beschichtungen im Produktionsmaßstab an der Beschichtungsanlage BA1 sind bei der Wieland Wicoatec GmbH wichtige Voraussetzungen geschaffen worden.

Beispiel 2

Beschichtung von Wärmeübertragern für Gasbrennwertgeräte

Beschreibung

Zur Steigerung der Energieeffizienz in der Gebäudeheizung werden Wärmeübertrager aus Edelstahl oder Aluminium an der Schnittstelle zwischen den heißen Verbrennungsgasen und dem Heizwasserkreislauf eingesetzt. Technisch unterscheiden sich diese Werkstoffe bzgl. Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Insbesondere für den Einsatz in der Gasbrennwerttechnik müssen Aluminium-Wärmeübertrager mit einer Korrosionsschutzbeschichtung ausgerüstet werden, um der Belastung durch Hitze, wässrige Kondensate mit sauer reagierenden Verbrennungsprodukten (z. B. Schwefeldioxid) auf Dauer standzuhalten. Üblicherweise räumen die Hersteller dem Endkunden Gewährleistungszeiträume bis zu 10 Jahren auf die Wärmeübertrager ein.

Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts mit einem großen Anbieter wurde bei Wieland Wicoatec ein Beschichtungssystem für Wärmeübertrager aus Aluminium-Druckguss entwickelt. Im Rahmen von Kurzzeit-Laboruntersuchungen gegen den Stand der Technik wurde festgestellt, dass mit den neu entwickelten WICOATEC®-Beschichtungen gleiche oder bessere Korrosionsschutzwirkungen erzielt werden können. Die Schichtdicken der Sol-Gel-Beschichtungen lagen zwischen 60 und 600 µm, WICOATEC®-Beschichtungen sind um Faktor 100 bis 1.000 dünner (300 bis 600 nm).

Informationen zu Hochrechnungen

Das Volumen für Gasbrennwertgeräte im europäischen Markt liegt mit leicht fallender Tendenz bei ca. 2 Mio. Einheiten pro Jahr. Unser Kunde hat nach eigenen Angaben einen Marktanteil von ca. 30% und plant bis zu 250.000 Einheiten der betreffenden Baureihe mit einer WICOATEC®-Beschichtung auszurüsten.

Sol-Gel Verfahren: Schichtdicke 60 bis 600 μm

WICOATEC: Schichtdicke 300 bis 600 nm

Die Beschichtungen bestehen in beiden Fällen im Wesentlichen aus SiO_2 . Für die Berechnung wird eine mittlere Dichte des (amorphen) SiO_2 von ca. 2 g / cm^3 angesetzt.

Beschichtete Oberfläche ca. 1 m^2 / Einheit

SiO_2 -Masse im Wärmeübertrager...

... für Sol/Gel-Verfahren: zwischen 120 g und 1.200 g SiO_2 /Einheit

... für Ressourcenverbrauch WICOATEC: zwischen 0,24 g und 2,4 g SiO_2 /Einheit und Jahr

Die Mehrmenge von 120 bis 1.200 g SiO_2 /Einheit (Faktor 50 bis 5.000) führt auch zu einer Erhöhung des Wärmeübergangswiderstands der Beschichtung um denselben Faktor. Als Kompensation muss die Oberfläche des Wärmeübertragers und damit das Gewicht des Wärmeübertragers im zweistelligen Prozentbereich vergrößert werden, um die Anforderungen der Energieeffizienz-Richtlinien zu erfüllen.

Hochrechnung für 100.000 Einheiten/a: 12 bis 120 Tonnen Schichtmasse/Jahr, die in Form lösemittelbasierter Sol-Gel-Lacksysteme in 5- bis 10-facher Menge aufgetragen werden müssten. Dabei sind Tauchverfahren wegen der kurzen Standzeiten weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll. Bei Spritzverfahren ist der Over Spray nicht wiederverwertbar.

Einordnung

Aufgrund der positiven Laborergebnisse und Benchmark-Untersuchungen und der hohe Kostenaufwand für die Durchführung von Labor- und Feldtests (> 0,5 Mio. €) lassen erwarten, dass der Kunde auch den Schritt der Markteinführung gehen wird. Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit robuster und wirtschaftlich zu betreibender Anlagentechnik, wie sie im Rahmen des Demonstrationsvorhabens realisiert wurde. Die letzte Sicherheit, ob und in welchem Umfang diese Markteinführung dann tatsächlich erfolgt, besteht erst, wenn die Lastwagen mit der Ware über unseren Hof rollen.

Diese Hochrechnungen beruhen auf Informationen, die uns erst in den zurückliegenden Wochen und Monaten von unseren Kunden während der Entwicklung der WICOATEC[®]-Beschichtung übermittelt wurden und die nicht öffentlich gemacht werden sollten. Die 2 Fallbeispiele wurden nach bestem Wissen und Gewissen geschätzt und mit den bei Wieland Wicoatec GmbH bekannten Marktinformationen hochgerechnet. In den beschriebenen 2 Einzelfällen konnten jeweils die umwelttechnischen Vorteile des WICOATEC[®]-Verfahrens eindeutig dargestellt werden.

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Positive Erfahrungen:

Die Planung, Bestellung, Montage und Inbetriebnahme aller Anlagen und Anlagenteile verlief im geplanten zeitlichen Rahmen. Ab dem Januar 2019 wurden die ersten Probebetrieb-Einfahrversuche am Beschichtungssofen BA1 durchgeführt. Da zwar die Anlagenverfügbarkeit zufriedenstellend war, aber noch an der Qualität der Produkte (Schichtdicke, Schichtdickenverteilung) optimiert werden musste, wurden die ersten Bemusterungen in Absprache mit dem Kunden auf April 2019 verschoben. Die weiteren Nullserien-Bemusterungen in Realanwendung waren im Juni 2019 erfolgreich und der Kunde erteilte somit die Serienfreigabe für die Anlagen BA1, BV2 und WB1. Die Beschichtungsanlage (BA1), die Vorbehandlung (BV2) und die Wassertechnik (WB1) sind aktuell voll einsatzbereit und werden unter Serienbedingungen im Einschicht- bzw. Zweischichtbetrieb verwendet. Da ein Großkunde im Juni 2019 nach der Freigabe des Prozesses seine Bestellungen um 100% gesteigert hatte, waren anschließend reale und aussagekräftige Serienbedingungen gegeben. Damit wurden für das Vorhaben alle notwendigen Kennzahlen mitgeschrieben und protokolliert.

Negative Erfahrungen und Optimierungen:

Die Komplexität der Sicherheitstechnik wurde unterschätzt, da bisher nur Erfahrungen aus den Laboranlagen im Projektteam existierten. Diese technische Lücken wurden jedoch in der anschließenden Optimierungsschleifen, nach dem P,D,C,A- Verfahren, rasch behoben. Das Thema Erdgasverbrauch bei der Nachverbrennung der Prozessabgase werden wir mit Nachdruck weiterverfolgen und die Zielerreichung anstreben.

4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)

Neben der technischen Bearbeitung des Vorhabens wurde das innovative CVD-Verfahren bei den verschiedenen Gremien, Messen, Summits etc. vorgestellt und vermarktet. Aus diesen Aktivitäten entstanden zahlreiche Interessenten mit denen wir weitere Beschichtungslösung umsetzen werden und konnten. Nachfolgen sind einige Aktivitäten aufgeführt:

- 2018/10 Teilnahme zusammen mit der Wieland-Werke AG an der Chillventa Nürnberg, Fachmesse für die Kälte/Klimatechnik
- 2019/03 Teilnahme zusammen mit der Wieland-Werke AG an der ISH Frankfurt, Weltleitmesse für Sanitär- und Heizungstechnik

BMU-Umweltinnovationsprogramm

- 2019/04 Teilnahme und Vortrag durch die Herren Dr. Merkel und Steinmann bei der Tagung HTRI Heat Exchanger Fouling & Cleaning Conference, Warschau
- 2019/10 Teilnahme zusammen mit der Wieland-Werke AG an DKV-Tagung in Ulm
- 2019/11 Teilnahme an der Messe Formnext / Additive Manufacturing in Frankfurt
- 2019/12 Teilnahme an der Fachtagung „Treatments and Finishing of Metallic Parts Produced by Additive Manufacturing“, Vortrag durch Herrn Werner und Herrn Kindler: “Functional CVD coating of additive manufactured, complex parts made from metal - corrosion protection, anti-stick and bonding agent”

Weitere Marketing Maßnahmen wurden für das Frühjahr 2020 geplant:

Die Teilnahme an folgenden Messen im Frühjahr 2020 mussten aufgrund der Corona-Pandemie abgesagt oder verschoben werden:

- Messe Mostra Convegno, Mailand
- Messe Tube, Düsseldorf
- Tagung Am4i, Ludwigsburg
- Tagung Schlüsseltechnologien, Lüdenscheid.

Die Teilnahme an folgenden Veranstaltungen sind für das 2. Halbjahr 2020 und das erste Halbjahr 2021 vorgesehen:

- 2020/11 DKV Tagung mit Vortrag durch Hr. Werner: Wirksamer Schutz vor Korrosion und Reduzierung der Verkalkungsneigung auf komplexen Geometrien mit Hilfe eines energetisch vorteilhaften Verfahrens
- 2020/10 Teilnahme an der Messe Analytica, München. Weltleitmesse für Labortechnik und Analytik
- 2020/10 Teilnahme an der Messe Aluminium, Düsseldorf
- 2021/03 Teilnahme am der AMSE Konferenz, Wien, Vortrag von Hr. Steinmann: Effective corrosion protection and scaling prevention of complex geometries

Es bestehen bereits Kontakte zu Firmen in der chemischen Industrie sowie in der Petrochemie. Tests an Mustern bzw. Bauteilen sind mit den meisten dieser Unternehmen bereits in Gange. Erste positive Rückmeldungen liegen vor.

Insbesondere im Bereich der Heizungstechnik konnten wir das WICOATEC®-Verfahren für Wärmetauscheranwendungen gut platzieren.

Parallel laufen die Arbeiten zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit und zur Prozessverbesserung weiter.

CVD-Verfahren werden auch in anderen Bereichen wie z. B. der Halbleitertechnik und im Maschinenbau genutzt. Im Maschinenbau wird die CVD-Technik u. a. zur Beschichtung von

Zerspanungswerkzeugen mit Hartschichten verwendet. Bezüglich der nicht SiO₂-basierten Hartschicht-anwendungen liegen uns keine belastbaren Informationen zur Anbieterstruktur vor.

5. Zusammenfassung

Einleitung

Die Wieland Wicoatec GmbH ist ein junges Unternehmen, das leistungsstarke CVD-Beschichtungen im Dünnschichtsegment herstellt. Im Süden Deutschlands entwickelt und produziert die Wieland Wicoatec GmbH Beschichtungen von hoher Qualität. Dafür stehen ein moderner Forschungsbereich der Wieland-Werke AG sowie Fertigungskapazitäten für unterschiedliche Bauteil- und Auftragsgrößen zur Verfügung. Mit einem weltweit einmaligen Dünnschichtprozess in CVD-Technik können Metallbauteile mit komplexer Oberflächen wirksam gegen Korrosion, Scaling und Fouling geschützt werden. Der Verzicht auf Vakuumtechnologie, die Absenkung der Prozesstemperatur durch Nutzung chemischer Reaktionen und die Reduzierung des Chemikalieneinsatzes über das patentierte Verweilzeitkonzept (Mehrfach-Pass) sind innovative Ansätze. Die innovative Prozesskette erfordert eine nachhaltige und großtechnische Umsetzung die eine Multiplikatoren Wirkung des gesamten Prozesses ermöglicht. Ziel des Vorhabens ist die Umsetzung signifikanter Umweltentlastungen gegenüber dem Einsatz etablierter Technik:

- Mit der WICOATEC®-Technologie können unter großtechnischen Bedingungen in der Serie Bauteile beschichtet werden.
- Dieser einmalige Dünnschicht CVD - Prozess heben sich durch höhere Energieeffizienz und geringere Emissionen deutlich vom Stand der Technik ab, hat insofern Vorzeigecharakter innerhalb der Branche, schafft und sichert Arbeitsplätze in Deutschland.

Marktseitige Treiber für die Entwicklung der Technologie und deren großtechnische Umsetzung:

- Miniaturisierung von Bauelementen bzw. Erhöhung der Leistungsdichte (z. B. Wärme-Übertragungsleistung / Bauvolumen) unter hochdynamischen Betriebsbedingungen führen zu Verschleiß, Leistungseinbußen durch Ablagerungen und Korrosion
- In vielen technischen Anwendungen (Investitions- und Konsumgüter) sind Schäden an Bauteilen durch Korrosion oder Leistungseinbußen durch Scaling und Fouling omnipräsent.

Vorhabenumsetzung

Aufgrund des innovativen Konzeptes des WICOATEC®-Verfahrens, gekennzeichnet durch einen Mehrfach-Pass der Beschichtungschemikalien über die zu beschichteten Aluminiumbauteile, werden erhebliche Energie- und Umweltpotentiale freigesetzt. Durch die Implementierung des Verweilzeitkonzepts wird der Chemieverbrauch in den Beschichtungsanlagen drastisch reduziert. Dadurch kann die aus Umwelt- und Sicherheitsgründen erforderliche Nachverbrennung der Abgase aus dem Beschichtungsöfen deutlich kleiner dimensioniert werden.

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Ergebnisse

Von den 5 definierten Zielen (siehe Nachfolgend) sind die Ziele 1-4 erreicht worden, bei dem Ziel Nummer 5 müssen noch weitere Verbesserungen durchgeführt werden.

Ziel	Zielbeschreibung	Einheit	Ziel Wert	Ist Wert 12/2019	Ist Wert 03/2020	Zielverbesserung %
1	Maximaler Chemikalienverbrauch: Silane (TMOS)	kg/t	12,4	9,6	5,3	57%
2	Maximaler Chemikalienverbrauch: Essigsäure (Hac)	kg/t	14,7	10,9	6,0	59%
3	Maximale Aluminium Belastung im Abwasser	kg Al/t	0,10	0,0005	0,0005	100%
4	Maximaler Stromverbrauch beim Aufheizen, Verdampfen & Überhitzen der Prozess-chemikalien	kWh/t	8,3	8,5	4,7	43%
5	Maximaler Erdgasverbrauch bei der thermischen Nachverbrennung der Prozessabgasen	kWh/t	95,8	519,5	257,6	-169%

Tabelle 10

Erreichte umwelttechnische Ziele in t/Jahr, für eine Vergleichsproduktion von 3.600 t/Jahr

Der Umsatz liegt deutlich hinter den ursprünglichen Annahmen zurück. Diese geänderten Rahmenbedingungen führten im April 2020 zu der Entscheidung, vorerst keine Investitionen in weitere neue Anlagen zu tätigen. Der Fokus liegt nun verstärkt auf der Auslastung der vorhandenen Kapazitäten, Aufbau der nötigen Marktakzeptanz und um damit dann in einen positiven EBITDA Bereich zu kommen.

Ausblick

Die Planung, Bestellung, Montage und Inbetriebnahme aller Anlagen und Anlagenteile verlief im normalen zeitlichen Rahmen. Die Beschichtungsanlage (BA1), die Vorbehandlung (BV2) und die Wassertechnik (WB1) sind aktuell voll einsatzbereit und werden unter Serienbedingungen im Einschicht- bzw. Zweischichtbetrieb verwendet. Dieses WICOATEC®-Verfahren hat für die Branche Modellcharakter, und basiert auf den Erwerb von Schutzrechten, und möglicher Lizenzierungen (z. B. für die großen Ölfirmen). Der Fokus liegt derzeit verstärkt auf der Auslastung der vorhandenen Kapazitäten, Aufbau der nötigen Marktakzeptanz um damit in einen positiven EBITDA Bereich zu kommen und bei Volllauslastung später in weitere Anlagen zu investieren.

5. Summary

Introduction

Wieland Wicoatec GmbH is a young organization that produces high-performance CVD coatings in the thin film segment. In southern Germany, Wieland Wicoatec GmbH develops and produces high-quality coatings. A modern research department of Wieland-Werke AG as well as production capacities for different components and order sizes are available for this purpose. With a worldwide unique thin film process using CVD technology, metal components with complex surfaces can be effectively protected against corrosion, scaling and fouling. Innovative approaches include avoiding vacuum technology and the lowering of process temperature by using chemical reactions and reducing the use of chemicals by means of the patented dwell time concept (multiple-pass). The innovative process chain requires a sustainable and large-scale technical implementation that enables a multiplier effect of the entire process. The aim of the project is the implementation of significant environmental relief compared to the use of established technology:

- With WICOATEC® technology, components can be coated in series production under large-scale technical conditions.
- This unique thin-film CVD process stands out clearly from the state-of-the-art thanks to its higher energy efficiency and lower emissions, and in this respect it is a showpiece within the industry, creating and securing jobs in Germany.

Market drivers for the development of the technology and its large-scale implementation:

- Miniaturization of components or increase of power density (e.g. heat transfer performance / construction volume) under highly dynamic operating conditions lead to wear and performance losses due to deposits and corrosion
- In many technical applications (capital and consumer goods), damage to components due to corrosion or loss of performance due to scaling and fouling are omnipresent.

Project Implementation

Due to the innovative concept of the WICOATEC® process, characterized by a multiple pass of the coating chemicals over the aluminium components to be coated, considerable energy and environmental potentials are released. By implementing the dwell time concept, the consumption of chemicals in the coating plants is drastically reduced. As a result, the afterburning of exhaust gases from the coating furnace, which is necessary for environmental and safety reasons, can be dimensioned much smaller.

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Project results

Of the five defined goals (see table below), goals 1-4 have been fully met, while further improvements are needed to meet goal number 5.

Goal Nr.	Goal Description	Unit	Goal Value	Actual Value 12/2019	Actual Value 03/2020	Goal Improvement %
1	Maximum chemical consumption: Silanes (TMOS)	kg/t	12,4	9,6	5,3	57%
2	Maximum chemical consumption: Acetic acid (Hac)	kg/t	14,7	10,9	6,0	59%
3	Maximum aluminium load in wastewater	kg Al/t	0,10	0,0005	0,0005	100%
4	Maximum power consumption for heating, evaporation & overheating of process chemicals	kWh/t	8,3	8,5	4,7	43%
5	Maximum natural gas consumption for the thermal post-combustion of process exhaust gases	kWh/t	95,8	519,5	257,6	-169%

Table 11

Achieved environmental targets in t/year, for a comparative production of 3,600 t/year

Revenue is well below the original assumptions. In April 2020, these changed conditions led to the decision not to invest in further new equipment for the time being. The focus is now increasingly on the utilization of existing capacities, building up the necessary market acceptance and thus achieving a positive EBITDA.

Prospects

The planning, ordering, assembly and commissioning of all equipment and plant components proceeded within the normal time frame. The coating (BA1), the pretreatment (BV2) and the water technology (WB1) plants are currently fully operational and are used under series conditions in one-shift or two-shift operation. This WICOATEC® process has a model character for the industry, based on the acquisition of property rights and possible licenses (e.g. for the major oil companies). The focus is currently more on the utilization of existing capacities, building up the necessary market acceptance to reach a positive EBITDA range and to invest in further equipment later on, when the current equipment is fully utilized.

6. Literatur

- Morita, K.: Chemical Vapor Deposition Method of Silicon Dioxide Film, US 5,360,646 (1994)
- Chemie Ingenieur Technik, Special Issue: Innovative Apparate zur Effizienzsteigerung, Volume 87, Issue 3, pages 185–187, March, 2015
- Merkel, T. et al.: Process for Depositing Ceramic or Organoceramic Material on a Substrate (US 9,169,552 // 27.10.2015)
- Aluminium-Taschenbuch, Band 2: Umformen, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling und Ökologie, Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf 1996
- UBA-Arbeitshilfe Berechnung CO₂- Äquivalenten:
https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/arbeitshilfe_zur_berechnung_und_bilanzierung_2014_0.xlsx
- Baumann, Werner; Herberg-Liedtke, Bettina: Chemikalien in der Metallverarbeitung. Daten und Fakten zum Umweltschutz, Springer Berlin Heidelberg 1995
- Führ, Martin Prof. Dr. et al.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Risikominderung für Industriechemikalien nach REACH – Anforderungen an eine Arbeitshilfe für Hersteller, Importeure und Stoffanwender, FKZ 204 67 462/04, Darmstadt/Frankfurt/Köln/Hamburg/Göttingen, September 2005
- Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics, September 2005
- Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC):Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry, December 2001
- Jepsen, Dirk; Winter, Klaus: Kurzexpertise BVT Standard in österreichischen Galvanikanlagen, Hamburg Dezember 2002
- OECD Environmental Health and Safety Publications, EMISSION SCENARIO DOCUMENT ON METAL FINISHING, Series on Emission Scenario Documents No. 12: Environment Directorate, Organisation for Economic Co-operation and Development, November 2004
- ZVO: Stellungnahme des Zentralverbandes Oberflächentechnik e.V. (ZVO) zum Konsultationsdokument „Registrierung, Evaluierung, Zulassung und Beschränkung von chemischen Stoffen (REACH)“ im Rahmen der von den EU-Generaldirektionen Umwelt und Unternehmen durchgeführten Internet-Konsultation

7. Anhang

Umrechnungsfaktoren:

520 g CO₂ / kWh elektrischer Energie; Quelle: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

242 g CO₂ / kWh Erdgas; Quelle: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

1.150,2 kg CO₂ / t Silane; Quelle: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. Merkel am 13.04.2017

1.469,7 kg CO₂ / t Essigsäure; Quelle: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. Merkel am 13.04.2017

Abkürzungen:

BA	-Beschichtungsanlage
BV	-Vorbehandlungsanlage
CO ₂	- Kohlendioxid
CSB	-Chemischer Sauerstoffbedarf

BMU-Umweltinnovationsprogramm

<i>Cu</i>	<i>-Kupfer</i>
<i>CVD</i>	<i>- engl. chemical vapor deposition; deut. Chemische Gasphasenabscheidung</i>
<i>DLC</i>	<i>-engl. diamond-like carbon; deut. Amorphe Kohlenstoffschichten</i>
<i>PDCA</i>	<i>-Plan / Do / Check / Act</i>
<i>PDA</i>	<i>-Prozessdatenerfassung</i>
<i>PVD</i>	<i>-engl. physical vapor deposition</i>
<i>TNV</i>	<i>-Thermische Nachverbrennung</i>
<i>VV</i>	<i>-Vorbehandlungsanlage</i>
<i>WB</i>	<i>-Wasseraufbereitungsanlage</i>

Maßeinheiten:

<i>h</i>	<i>-Stunde</i>
<i>kg</i>	<i>-Kilogramm</i>
<i>kg/a</i>	<i>-Kilogramm pro Jahr</i>
<i>kWh/t</i>	<i>-Kilowattstunde pro Tonne</i>
<i>m²K/W</i>	<i>-Foulingwiderstand</i>
<i>m³/Tag</i>	<i>-Kubikmeter pro Tag</i>
<i>MWh</i>	<i>-Megawattstunde</i>
<i>MWh/a</i>	<i>-Megawattstunde pro Jahr</i>
<i>t</i>	<i>-Tonne</i>
<i>t/a</i>	<i>-Tonne pro Jahr</i>
<i>Wh</i>	<i>-Wattstunde</i>
<i>°C</i>	<i>-Grad Celsius</i>