

Abschlussbericht

zum Vorhaben

Produktionsanlage zur umweltschonenden Herstellung von beschichteten Brems Scheiben – ein Beitrag zur Reduktion von Feinstaub und CO²-Emissionen im Straßenverkehr („Low Emission Brake“)

Zuwendungsempfänger/-in

GOTEC Brake Disc Coatings GmbH

Umweltbereich

Ressourcen, Luft, Energieeinsparung

Laufzeit des Vorhabens

01.12.2021 bis 31.12.2024

Autor/-en

*Franco Arosio, Director Business Development & Application; GOTEC Brake Disc Coatings GmbH
Felix Schulte, Managing Director; GOTEC Brake Disc Coatings GmbH*

Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Datum der Erstellung

13.06.2025

Berichts-Kennblatt

| | |
|---|---|
| Aktenzeichen UBA: NKa3 - 003609 | Projekt-Nr.: 3609 |
| Titel des Vorhabens: <i>Produktionsanlage zur umweltschonenden Herstellung von beschichteten Brems Scheiben – ein Beitrag zur Reduktion von Feinstaub und CO²-Emissionen im Straßenverkehr („Low Emission Brake“)</i> | |
| Autor/-en (Name, Vorname): Franco Arosio Felix Schulte | Vorhabenbeginn: 01.12.2021 Vorhabenende (Abschlussdatum): 31.12.2024 |
| Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): GOTEC Brake Disc Coatings GmbH | Veröffentlichungsdatum: Seitenzahl: 18 |
| Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit | |
| <p>Hartstoffbeschichtete Brems Scheiben werden zunehmend in PKW und Nutzfahrzeugen eingesetzt, da sie in erheblichem Maße zur Feinstaub- und CO₂-Reduktion [5,7,13] im Straßenverkehr sowie zur Standzeiterhöhung beitragen. Bis heute werden diese jedoch in klassischen Fertigungsfolgen mit äußerst hohem Ressourceneinsatz hergestellt. Allein die bei der Herstellung emittierten Schadstoffe überschatten die ökologischen Vorteile in der Anwendung erheblich und stehen damit im krassen Widerspruch zum Anspruch der Emissionsreduktion. Durch die Entwicklung eines neuen Laserbeschichtungsprozesses könnten Brems Scheiben heute erheblich ressourcenschonender produziert werden: Erste Technologieunternehmen haben dazu nachhaltigen Fertigungsfolgen erarbeitet und weltweit erste Skalierbarkeitsnachweise für die Großserie erbracht [11,12]. Die GOTEC-Brake Disc Coatings GmbH ist Beschichtungsdienstleister und plant die erste Produktionsanlage zu beschaffen. Somit könnten beschichtete Brems Scheiben weltweit erstmalig ressourcen-effizient in Deutschland produziert werden und als Multiplikatoreffekt in ganz Europa wirken.</p> | |
| Schlagwörter: Feinstaub, Luft, CO ₂ Reduktion, Energieeffizienz, PM ₁₀ , EURO 7 Abgasregulation, Lebensdauerbrems Scheibe | |

| | |
|---|---|
| Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: 1 Elektronischer Datenträger: 1 | Sonstige Medien: - Veröffentlichung im Internet ge- plant auf der Webseite: - |
|---|---|

Report Coversheet

| | |
|---|---|
| Reference-No. Federal Environment Agency: NKa3 - 003609 | Project–No.: 3609 |
| <p>Report Title:</p> <p>Production machines for environmentally-friendly manufacture of coated brake discs – a contribution to the reduction of PM and CO2 emissions in traffic (“low emission brake”)</p> | |
| <p>Author/Authors (Family Name, First Name):</p> <p>Franco Arosio</p> <p>Felix Schulte</p> | <p>Start of project:</p> <p>01.12.2021</p> <hr/> <p>End of project:</p> <p>31.12.2024</p> |
| <p>Performing Organisation (Name, Address):</p> <p>GOTEC Brake Disc Coatings GmbH</p> | <p>Publication Date:</p> <hr/> <p>No. of Pages: 18</p> |
| <p>Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.</p> | |
| <p>Summary (max. 1.500 characters):</p> <p>Hard-coated brake discs are increasingly being used in cars and commercial vehicles, as they contribute significantly to reducing particulate matter and CO2 emissions in road traffic and to increasing service life. However, to date, these discs are manufactured using traditional production processes that require extremely high levels of resources. The pollutants emitted during production alone significantly overshadow the ecological benefits of their use, thus standing in stark contrast to the goal of reducing emissions. The development of a new laser coating process could significantly improve the resource efficient production of brake discs: A few technology companies have developed sustainable production processes for this purpose and provided the world's first proof of scalability for large-scale production. GOTEC-Brake Disc Coatings GmbH is a coating service provider and plans to acquire the first production facility. This would make it possible for coated brake discs to be produced in Germany for the first time in a resource-efficient manner, creating a multiplier effect throughout Europe.</p> | |
| <p>Keywords:</p> <p>Fine dust, air, CO2 reduction, energy efficiency, PM10, EURO 7 emission regulation, lifetime brake disc</p> | |

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| 1. Einleitung | 5 |
| 1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner..... | 5 |
| 1.2. Ausgangssituation | 5 |
| 2. Vorhabenumsetzung | 5 |
| 2.1. Ziel des Vorhabens..... | 5 |
| 2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten) | 6 |
| 2.3. Umsetzung des Vorhabens | 7 |
| 2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen) | 7 |
| 2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten | 8 |
| 2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms..... | 8 |
| 3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung | 8 |
| 3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung | 8 |
| 3.2. Stoff- und Energiebilanz..... | 8 |
| 3.3. Umweltbilanz | 9 |
| 3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse | 12 |
| 3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren | 12 |
| 4. Übertragbarkeit | 14 |
| 4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung | 14 |
| 4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)..... | 14 |
| 4.3. Kommunikation der Projektergebnisse | 14 |
| 5. Zusammenfassung/ Summary | 15 |
| 5.1. Einleitung/Introduction..... | 15 |
| 5.2. Vorhabenumsetzung/Project implementation..... | 15 |
| 5.3. Ergebnisse/Project results | 16 |
| 6. Ausblick / Prospects | 16 |
| 7. Literatur | 17 |

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner

GOTEC Brake Disc Coatings GmbH ist ein Unternehmen, das sich auf die Laserbeschichtung von Bremscheiben spezialisiert hat – sowohl gemäß den Anforderungen der EURO-7-Abgasnorm als auch nach Aftermarket-Spezifikationen. GOTEC entwickelt den Beschichtungsprozess bis zur Serienreife und industrialisiert die Laserbeschichtung im Rahmen der Bremscheibenbeschichtung zur Reduktion von Feinstaubemissionen. Ziel ist die Erfüllung der ab 2026 geltenden EURO-7-Vorgaben. Das Unternehmen ist in der Automobilbranche tätig – sowohl direkt als Tier-1-Lieferant für OEMs als auch als Tier-2-Zulieferer.

1.2. Ausgangssituation

Die bislang einzige in größerer Serie gefertigte Bremscheibe mit Hartstoffbeschichtung ist die PSCB (Porsche Surface Coated Brake) von Porsche. Dabei wird zunächst eine galvanische Zwischenschicht aufgetragen, bevor anschließend die Endbeschichtung mittels HVOF-Verfahren (High Velocity Oxygen Fuel) erfolgt.

Insbesondere das HVOF-Verfahren zeichnet sich durch einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad von typischerweise 30 bis 50 % aus [15]. Besonders hervorzuheben sind der hohe Verbrauch an Brenngas (z. B. Kerosin) sowie der erhebliche Strombedarf – beide Faktoren sind im Rahmen der Medienverbräuche energetisch und ökologisch bedeutsam. Eine Übersicht über die einzelnen Energieverbräuche findet sich in Tabelle 3-1: Vergleich des CO₂-Bedarfs im Rahmen der Forschung am ITP Fraunhofer in Aachen wurde das EHLA-Verfahren entwickelt (Extrem Hochgeschwindigkeit Laser Auftragsschweißen). Dies musste nun noch industrialisiert werden.

2. Vorhabenumsetzung

2.1. Ziel des Vorhabens

Ziel des Vorhabens war die Industrialisierung des EHLA-Prozesses (Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragsschweißen) sowie der Nachweis seiner signifikant höheren Effizienz im Vergleich zu konventionellen Beschichtungsverfahren. Im Fokus stand dabei insbesondere die erhebliche Reduktion der CO₂-Äquivalente um über 70 %.

Diese Einsparung resultiert aus einem deutlich geringeren Energieverbrauch – insbesondere durch die Reduktion von Kerosin –, einem reduzierten Materialeinsatz sowie einem insgesamt effizienteren Ressourceneinsatz im Beschichtungsprozess. Der EHLA-Prozess trägt somit wesentlich zur Umweltfreundlichkeit und Nachhaltigkeit in der industriellen Fertigung bei.

2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Die zugrunde liegende Verfahrenskette der beschafften Anlage wird im Wesentlichen durch den Laserbeschichtungsprozess sowie das darauf abgestimmte Finishing-Verfahren definiert. Abbildung 2-2 zeigt die hierfür beschafften Anlagen. Auf der linken Seite ist die EHLA Beschichtungszelle WECODUR 450 TWIN abgebildet, links eine doppelplan Schleifanlage TYP DWGF 450 der Firma EMAG.

Der Beschichtungsprozess basiert auf dem von der RWTH Aachen und der Fraunhofer-Gesellschaft entwickelten Verfahren des Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen. Im Gegensatz zum klassischen Laserauftragschweißen (LMD) wird beim EHLA-Verfahren die Energie des Laserstrahls nicht primär in das Substrat eingebracht, um dort ein Schmelzbad zu erzeugen, in dem das Zusatzmaterial aufgeschmolzen wird. Stattdessen wird der Laserfokus leicht oberhalb der Substratoberfläche positioniert (siehe Abbildung 2-1) [14].

Dies führt zu einer veränderten Wärmebilanz: Die Energieeinbringung erfolgt primär in das Zusatzmaterial im Pulvergasstrahl, das bereits im Laserfokus also oberhalb des Werkstücks aufgeschmolzen wird. Das Substrat selbst wird dabei lediglich so weit erhitzt, dass es lokal anschmilzt und eine schmelzmetallurgische Verbindung mit dem Beschichtungsmaterial eingeht.

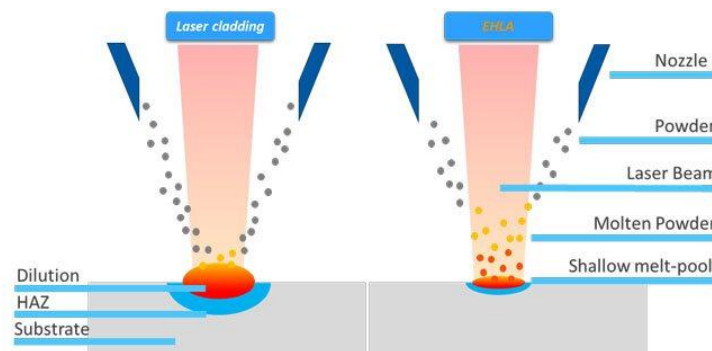


Abbildung 2-1: Vergleich Laser Cladding vs. EHLA

Durch dieses Verfahren können die für beschichtete Bremscheiben erforderlichen dünnen Schichten technisch realisiert werden. Gleichzeitig zeigt die Ökobilanz, dass dieser Ansatz gegenüber konventionellen Prozessketten deutlich wirtschaftlicher und umweltschonender ist [2,3,4,6, 14].



Abbildung 2-2: Setup Alsdorf (links: EHLA TWIN Beschichtungszelle / rechts: Schleifanlage)

2.3. Umsetzung des Vorhabens

Die Umsetzung des Vorhabens zur Herstellung beschichteter Bremscheiben gliederte sich in mehrere aufeinanderfolgenden Phasen:

Im Juni 2020 wurde die GOTEC Brake Disc Coatings GmbH gegründet, um die Entwicklung und Produktion beschichteter Bremscheiben gezielt voranzutreiben. Im Zeitraum von Januar bis Dezember 2021 erfolgte die detaillierte Planung der Produktionslinie sowie die Beantragung entsprechender Fördermittel.

Die finale Ausarbeitung der technischen Anforderungen und die Auslösung der Bestellung der benötigten Anlagentechnik wurden im ersten Halbjahr 2022 (Januar bis Juni) abgeschlossen. Bereits im November 2022 konnte die erste Vorabnahme beim Maschinenbaupartner erfolgreich durchgeführt werden.

Die Lieferung und anschließende Inbetriebnahme der Anlage fanden zwischen April und Oktober 2023 statt. Im Anschluss daran wurde im Zeitraum von November 2023 bis Juni 2024 eine intensive Entstörungs- und Optimierungsphase durchgeführt, um die Maschine prozesssicher und funktionsfähig auszugestalten.

Im Juni 2024 erfolgte die finale Abnahme der Anlage, wenn auch mit einigen Einschränkungen. Die abschließende Phase von Juli bis Dezember 2024 war der Behebung verbliebener Mängel sowie dem Erreichen der vollen Serienprozessreife gewidmet.

2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Durch den eingehausten Prozess sowohl in der Beschichtungs- als auch in der Schleifmaschine sind keine besonderen behördlichen Genehmigungen erforderlich.

2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Ziel dieses Projekts war die Installation einer hochmodernen Maschine mit dem EHLA-Verfahren und die Demonstration der CO₂-Äquivalent-Emissionen dreier unterschiedlicher Verfahren: der HVOF-Beschichtung, des EHLA-Verfahrens, berechnet im Jahr 2020, und des EHLA-Verfahrens nach Abschluss der Optimierungsphase im Jahr 2024.

2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms¹

Es wurden keine Messprogramme durchgeführt

3. **Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung**

3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung

Im Rahmen des Projekts konnte die geplante Umsetzung grundsätzlich erfolgreich realisiert werden. Trotz einiger Herausforderungen im Projektverlauf wurden bedeutende Fortschritte erzielt und mehrere wichtige Meilensteine erreicht.

Während des Projektverlaufs traten verschiedene technische und organisatorische Schwierigkeiten auf, die zu Verzögerungen führten. Dennoch konnten durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Hersteller praktikable Lösungen erarbeitet werden. Hervorzuheben ist insbesondere die konstruktive Kommunikation sowie die gemeinsame Dokumentation und Analyse aufgetretener Störungen, aus der konkrete Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet wurden. Beispielsweise sei hier die Integration eines zusätzlichen Einrichtbetriebes inklusive Handbediengerät oder aber die Einführung einer zusätzlichen Maschinendatenerfassung zur Qualifizierung der Beschichtungsergebnisse genannt.

Im Rahmen der Vorhabendurchführung wurde die Anlage umfangreich getestet und im Rahmen der industriellen Portotypen und Kleinserienfertigung erprobt.

Trotz einzelner Schwierigkeiten konnte durch eine zielgerichtete Zusammenarbeit eine solide technische Basis geschaffen werden. Die Umsetzung der im Dezember 2024 offenen Maßnahmen wurde weiterhin eng abgestimmt und begleitet, sodass die abschließende Maschinenfähigkeitsuntersuchung im Februar 2025 abgeschlossen werden konnte.

3.2. Stoff- und Energiebilanz

Im Rahmen der Erfolgskontrolle wurden die Verbrauchsdaten der verschiedenen Verfahren hinsichtlich Material- und Stromverbrauchs verglichen, um die Zielerreichung in diesen Bereichen nachzuvollziehen.

¹ Sofern durchgeführt

Die Verbrauchswerte des konventionell eingesetzten thermischen Spritzens belaufen bei marktüblichen Anwendungen erfahrungsgemäß auf *17,5 kWh* Strom und *1.139 g* Material. Beim Laserauftragsschweißen 2020 konnte der Stromverbrauch deutlich reduziert werden, auf nur *4,2 kWh* pro Werkstück. Der Materialverbrauch lag bei *707 g*, was ebenfalls eine signifikante Einsparung im Vergleich zur konventionellen Methode darstellt.

Beim Laserauftragsschweißen 2024 mit der GOTEC-Beschichtung konnte der Stromverbrauch weiter gesenkt werden, auf nur *1,54 kWh*, und der Materialverbrauch fiel auf *678,1 g*.

Bei der neuen Technologie des Hochgeschwindigkeits-Laserauftragsschweißen können die abgesaugten Pulverstäube grundsätzlich unter bestimmten Voraussetzungen gesammelt und wieder aufbereitet werden. GOTEC hat im Zuge des Förderprojekts Pulverhersteller dazu befragt und es bestehen Möglichkeiten reinsortige Pulverstäube erneut zu sieben und somit weiter zu verwenden. Da die Fließfähigkeit aufgrund bestehender, spratziger Residien im gesiebten Pulver nicht definiert eingestellt werden kann, ist eine Weiterverwendung bei der Hochgeschwindigkeits-Laserauftragsschweißtechnologie voraussichtlich nicht umsetzbar, in weniger sensiblen Prozessen wie bspw. Pulverbettverfahren („klassischer 3D-Druck“) könnte dies jedoch weiterverwendet werden.

Bei GOTEC kann das Thema der Rückgewinnung allerdings - Stand heute - nicht ohne Weiteres verfolgt werden, da in den Prozesskammern aktueller Pulvermischungen aus Karbiden und Metallen verarbeitet werden. Aufgrund teils nur geringer Dichtunterschiede ist eine Trennung aufwändig bzw. kaum möglich. Zudem stellt die aktuelle Vielfalt der eingesetzten Schichtsysteme eine Herausforderung dar, eine Umsetzung ist daher eher in einer Großserienproduktion mit wenigen Bauteilvarianten denkbar. Es ist aber weiterhin denkbar dies zu einem späteren Zeitpunkt auch bei GOTEC umzusetzen, bei möglichen Anlagenerweiterungen oder dem Einsatz von sogenannten „Single-Layern“, bei denen nur ein Material eingesetzt wird.

Auf der Seite des Schleifprozesses konnten bis dato noch keine Möglichkeiten der Aufbereitung gefunden werden. Zusätzlich zur o.g. Problematik der Pulverdurchmischung sind die Ablagerungen im Kühlschmierstoff stark mit abgetragenen Schneidmitteln und Bindemitteln von den Schleifwerkzeugen kontaminiert.

3.3. Umweltbilanz

Die Umweltbilanz dreier Beschichtungsverfahren für Bremscheiben – HVOF-Thermospritzen, Wecodur-Laserauftragsschweißen (2020) und GOTEC-Laserauftragsschweißen (2024) – wurde anhand von Energie- und Materialverbrauch, CO₂-Emissionen sowie Abfallströmen bewertet.

Das konventionelle HVOF-Verfahren verursacht mit ca. *17,5 kWh* Strom, *3,3 dm³* Kerosin, *7,2 m³* Sauerstoff und *1.139 g* Material pro Werkstück die höchsten CO₂-Emissionen von *26,89 kg*. Besonders der Energiebedarf für die Verbrennung von Kerosin und Sauerstoff sowie die elektrische Leistung zum Spritzen und Kühlen sind Ursachen.

Die Wecodur-Beschichtung reduziert den Verbrauch deutlich: 4,2 kWh Strom, kein Kerosin oder Sauerstoff, dafür 108 dm³ Argon und 707 g Material. Die CO₂-Bilanz sinkt auf 3,97 kg je Brems Scheibe, was einer Reduktion von ca. 85% gegenüber HVOF entspricht.

Die neueste GOTEC-Technologie braucht 1,54 kWh Strom, 193,7 dm³ Argon und 678 g Material und erreicht 2,89 kg CO₂ pro Stück, eine Reduzierung von 89% im Vergleich zu HVOF und 27% zu Wecodur.

Neben den direkten Emissionen sind Abfallströme wie Pulverreste, Kühlschmierstoffe und Schleifschlamm in die Bilanz einzubeziehen. Diese fallen bei HVOF aufgrund hoher Materialverluste und Einsatz chemischer Stoffe am stärksten an. Die Laserauftragsverfahren verringern Abfälle durch präzise Materialauftragstechniken und verbesserte Kühlung deutlich. Die GOTEC-Technologie erzielt somit nicht nur die niedrigsten CO₂-Emissionen, sondern auch die größte Umweltentlastung durch geringere Abfallmengen und optimierte Ressourcennutzung.

Insgesamt wurden 678 g Pulver gefördert, wovon 471,3 g direkt im Beschichtungsprozess eingesetzt wurden. Dies entspricht einer aufgetragenen Beschichtungsmenge von 434,2 g. Der Gesamtwirkungsgrad der Beschichtung beträgt 65 % und wird derzeit maßgeblich durch die noch hohe Prozessvorlaufzeit beeinflusst, die aktuell etwa 30 Sekunden beträgt und sich noch in der Entwicklung befindet. Der Wirkungsgrad des reinen Laserprozesses (Pulverauftrag) liegt bereits bei über 92 %. Durch eine Optimierung der Vorlaufzeit ist es realistisch, im Serienprozess einen Pulverwirkungsgrad von etwa 85 % zu erreichen.

Aufgrund des Prozessablaufs ist eine separate Bestimmung der einzelnen Gewichte von Haft- und Reibschicht nicht möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Wirkungsgrade beider Schichten identisch sind.

Im Anschluss erfolgte ein Schleifprozess, bei dem CBN-Schleifmittel mit Metallbindung eingesetzt wurden. Die berechnete Segmentfläche pro Schleifpunkt beträgt 217 mm², was bei 24 Segmenten eine Gesamtfläche von 5.208 mm² ergibt. Der durchschnittliche Abtrag pro geschliffener Scheibe liegt bei etwa 1 µm. Die Gewichtsänderung vor und nach dem Schleifen betrug 89,3 g, was einem Materialabtrag bei einem Schleifaufmaß von etwa 200 µm entspricht. Da der Kühlschmierstoff in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird, treten während des Prozesses keine direkten Verluste auf.

Schlussfolgerung Beschichtung:

Der Gesamtwirkungsgrad der Beschichtung liegt aktuell bei 65 %. Dieser Wert wird durch die noch nicht optimierte Vorlaufzeit beeinflusst. Der reine Laserprozess zeigt bereits einen sehr hohen Wirkungsgrad von über 92 %, was das Potenzial für eine effiziente Serienfertigung unterstreicht. Ziel ist es, durch Prozessoptimierung einen Wirkungsgrad von 85 % zu erreichen.

Schlussfolgerung Schleifen:

Durch Verbesserungen im Beschichtungsprozess konnte das Schleifaufmaß für bestimmte Schichtsysteme bereits auf 150 µm reduziert werden. Ziel bis zur Serienreife ist eine weitere Reduktion auf 100 µm, um den Materialabtrag und damit die Abfallströme signifikant zu verringern.

Zusammenfassend zeigt die Weiterentwicklung von HVOF über Wecodur zu GOTEC eine deutliche Verbesserung der Umweltverträglichkeit: Energie-, Emissions- und Abfallmengen pro Werkstück sinken kontinuierlich. Dies bestätigt den Erfolg technologischer Innovationen hinsichtlich Nachhaltigkeit und Umweltschutz.

Abbildung 3-1 und Tabelle 3-1 stellen die CO₂-Emissionsentwicklung und den Beitrag der Abfallreduktion grafisch dar.

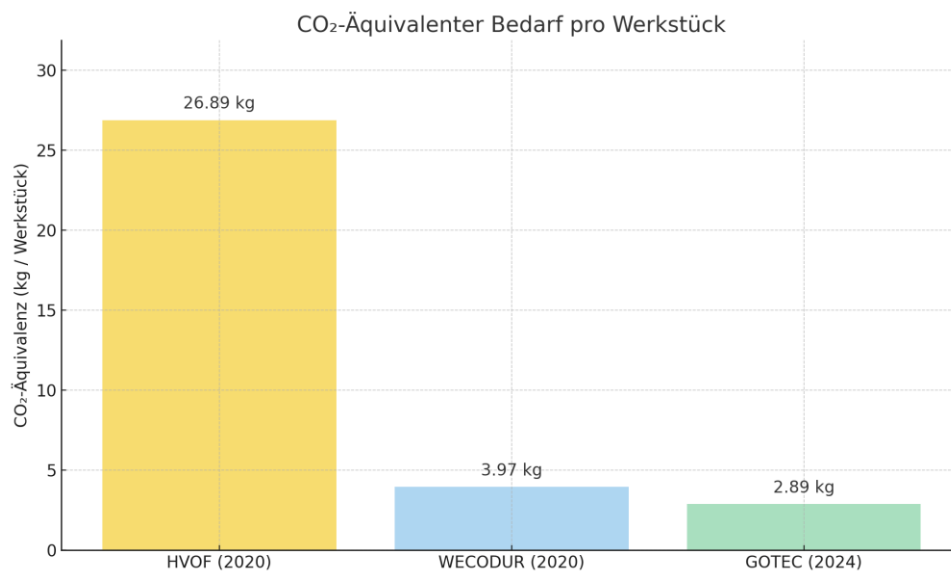


Abbildung 3-1: Reduktion des Co2 Verbrauchs

| | Verbräuche je Werkstück | Strom | Kerosin | Sauerstoff | Argon | Material |
|----|---------------------------------------|----------|---------|--------------|--------|----------|
| a) | Konventionell (therm. Spritzen) | in kWh | in dm3 | m3 | in dm3 | in g |
| a1 | Oberflächenaktivierung | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| a2 | Galvanik/ Bindschicht | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| a3 | HVOF / Reibschicht | 16,3 | 3,3 | 7,2 | 0 | 950 |
| a4 | Finshing | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 189 |
| | SUMME a) | 17,5 | 3,3 | 7,2 | 0 | 1.139,00 |
| | Äquivalenter CO2-Bedarf | 8,21 | 9,59 | 6,35 | | 2,74 |
| | in kg / Werkstück | Σ | | 26,89 | | |
| | b) Laserauftragsschweißen 2020 | | | | | |
| b3 | WECODUR-Beschichtung | 3,7 | 0 | 0 | 108 | 599 |
| b4 | Finshing | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 108 |
| | SUMME b) | 4,2 | 0 | 0 | 108 | 707 |
| | Äquivalenter CO2-Bedarf | 1,97 | | | 0,3 | 1,7 |
| | in kg / Werkstück | Σ | | 3,97 | | |
| | c) Laserauftragsschweißen 2024 | | | | | |
| c3 | GOTEC Beschichtung | 1,04 | 0 | 0 | 193,7 | 570,1 |
| c4 | Finshing | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 108 |
| | SUMME b) | 1,54 | 0 | 0 | 193,7 | 678,1 |
| | Äquivalenter CO2-Bedarf | 0,72 | | | 0,54 | 1,63 |
| | in kg / Werkstück | Σ | | 2,89 | | |

Tabelle 3-1: Vergleich des CO2-Bedarfs

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse ist aufgrund der beinhaltenen Informationen vertraulich und wird daher nicht veröffentlicht

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

In der bis heute verbreiteten Fertigungsfolge zur Hartstoffbeschichtung von Bremscheiben (und auch sonstigen Substraten) werden häufig noch äußerst chemikalien- und ressourcenintensive Technologien eingesetzt. Ausgehend von einer mechanisch vorbearbeiteten Refe-

renzbremsscheibe (Typ 415 x 40) muss die zu beschichtende Funktionsfläche zunächst mechanisch und/oder chemisch aktiviert werden, um eine spätere formschlüssige Anbindung der aufgespritzten Hartstoffschicht zu gewährleisten (Tabelle 3-2 links, a1). Es folgt der Galvanik-Auftrag einer Nickelschicht (a2), der u.a. aufgrund der eingesetzten Chemikalien häufig an externen Standorten, teils sogar im Ausland realisiert wird [8].

| a) Konventionell (thermisches Spritzen) | | b) Fertigungsfolge mit Laserauftragschweißen | |
|---|------------------------------------|--|--------------------------|
| | Vorbearbeiteter Rohling | | Vorbearbeiteter Rohling |
| | ↓ | | ↓ |
| a1 | Mechanische Oberflächenaktivierung | | - |
| | ↓ | | ↓ |
| a2 | Galvanik/ Bindschicht | | - |
| | ↓ | | ↓ |
| a3 | HVOF/ Reibschicht | b3 | WECODUR-Beschichtung |
| | ↓ | | ↓ |
| a4 | Finishing | b4 | Finishing |
| | ↓ | | ↓ |
| | Langzeitkorrosionsschutz | | Langzeitkorrosionsschutz |

Tabelle 3-2: Gegenüberstellung der Fertigungsfolgen "thermischen Spritzen" und "Laserauftragschweißen"

Anschließend erfolgt das Aufspritzen einer Verschleißschicht (Tabelle 3-2, links, a3), die aus einer Edelstahl-Karbid-Zusammensetzung besteht. Bei diesem Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (z.B. HVOF - "High Velocity Oxygen Fuel") werden die Partikel durch das Verbrennen eines Fluids mit hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche der Bremsscheibe befördert [9,10]. In den hierfür eingesetzten Anlagen werden bspw. bei der o.g. Referenzscheibe ca. 28 l Kerosin sowie über 60 m³ Sauerstoff pro Stunde zugeführt und verbrannt, gleichzeitig muss die entstehende Wärme durch eine Hochleistungskühlung abgeführt werden. Die Taktzeit für diesen Prozess beträgt trotz des großen Ressourcenverbrauchs allein für dieses Schritt des thermischen Spritzens ca. 7 min. pro Bremsscheibe. Wie in Tabelle 3-2 dargestellt werden durch die Mediengewinnung bzw. -herstellung der beiden Fluide sowie durch den Verbrennungsprozess damit zusammen pro Bremsscheibe ca. 15,94 kg CO₂ emittiert (Kerosin: 9,59 kg CO₂, Sauerstoff: 6,35 kg CO₂), hinzu kommt alleine bei diesem Prozessschritt ein Stromverbrauch inklusive Kühlung mit ca. 16,3 kWh (s. Tabelle 3-2, a3), der unter Berücksichtigung des heutigen Strommixes in Deutschland je Bremsscheibe weitere 7,63 kg CO₂-Emissionen pro Scheibe verursacht, gemeinsam mit allen Fertigungsschritten werden damit insgesamt 8,21 kg CO₂ durch den Stromverbrauch emittiert.

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Industrialisierung des Prozesses und Inbetriebnahme der Maschine waren mit verschiedenen Problemen verbunden, insbesondere die Beherrschung des Prozesses und seiner vielen Einflussfaktoren birgt Herausforderungen. Stabilere Prozessfenster und -komponenten helfen in der Serienproduktion diese Probleme zu reduzieren oder gar auszuschließen.

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

Aufgrund der im Rahmen der Euro-7-Norm erfolgten Regulierung der Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge wird sich das EHLA-Verfahren (Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen) als bevorzugte Technologie für die Beschichtung von Bremsscheiben durchsetzen. Bereits heute setzen sämtliche führenden Automobilhersteller (OEMs) auf diese Technologie und bereiten deren Einsatz in der Serienproduktion aktiv vor.

Derzeit existieren rund ein Dutzend Maschinenhersteller, die EHLA-fähige Anlagen entwickeln. Um den Bedarf für die Beschichtung der europäischen Fahrzeugvolumina zu decken, wird bis zum Jahr 2028 mit der Produktion von etwa 100 Maschinen dieses Typs gerechnet. Parallel dazu wird das EHLA-Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt, insbesondere mit Blick auf den Einsatz in weiteren verschleißkritischen Anwendungen. Der aktuelle Fokus liegt auf rotations-symmetrischen Bauteilen wie Bolzen in der Windkrafttechnik sowie Walzen in der Stahl- und Papierindustrie.

Langfristig bietet das EHLA-Verfahren das Potenzial, in Anwendungsbereichen als nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Verfahren wie dem Hartverchromen eingesetzt zu werden.

4.3. Kommunikation der Projektergebnisse

Derzeit werden die bisherigen Ergebnisse sowie die Gesamtproduktion im Rahmen von Fachmessen – unter anderem auf der Automechanika 2024 in Frankfurt und der Eurobrake 2024 in Mainz – einem Fachpublikum präsentiert. Darüber hinaus erfolgt eine kontinuierliche Veröffentlichung relevanter Inhalte auf der Unternehmenswebseite der GOTEC Brake Disc Coatings GmbH. Eine gezielte Zusammenarbeit mit der Fach- oder Tagespresse wurde bislang noch nicht initiiert.

5. Zusammenfassung/ Summary

5.1. Einleitung/Introduction

Die GOTEC Brake Disc Coatings GmbH ist ein Unternehmen, das sich auf die Laserbeschichtung von Brems scheiben spezialisiert hat, insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen der EURO 7 Abgasnorm und Aftermarket-Spezifikationen. Das Unternehmen entwickelt den Beschichtungsprozess zur Serienreife und industrialisiert die Laserbeschichtung im Rahmen eines Projekts zur Feinstaubreduktion und zur Erreichung der ab 2026 geltenden Abgasnormen. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Produktion einer neuen Produktionsanlage für umweltschonende, beschichtete Brems scheiben geplant, um die CO₂- und Feinstaubemissionen im Straßenverkehr signifikant zu verringern.

GOTEC Brake Disc Coatings GmbH is a company specializing in the laser coating of brake discs, particularly in line with the EURO 7 emission standards and aftermarket specifications. The company is developing the coating process to industrial scale and is industrializing laser coating as part of a project aimed at reducing fine dust and achieving the emission standards that will apply from 2026. As part of this project, the production of a new manufacturing plant for environmentally friendly, coated brake discs was planned to significantly reduce CO₂ and fine dust emissions in road traffic.

5.2. Vorhabenumsetzung/Project implementation

Ziel des Vorhabens war die Industrialisierung des Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißverfahrens (EHLA) und die Demonstration seiner deutlich höheren Effizienz, die zu einer Reduktion der CO₂-Äquivalente um mehr als 70 % führt. Das Projekt umfasste die Entwicklung und den Aufbau einer Produktionsanlage für die Laserbeschichtung von Brems scheiben. Diese neue Technik soll nicht nur die Ressourceneffizienz steigern, sondern auch den ökologischen Fußabdruck in der Produktion von beschichteten Brems scheiben drastisch reduzieren.

The goal of the project was to industrialize the Extreme High-Speed Laser Cladding (EHLA) process and demonstrate its significantly higher efficiency, which leads to a reduction in CO₂ equivalents by more than 70%. The project involved the development and establishment of a production plant for the laser coating of brake discs. This new technology is expected to not only improve resource efficiency but also drastically reduce the environmental impact in the production of coated brake discs.

5.3. Ergebnisse/Project results

Die Umsetzung des Vorhabens war erfolgreich. Der CO₂-Ausstoß konnte im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren deutlich gesenkt werden. Während die herkömmliche HVOF-Beschichtung 2020 noch 26,82 kg CO₂ pro Bremsscheibe verursachte, konnte dieser Wert durch die innovative Wecodur-Beschichtung auf 3,97 kg CO₂ pro Stück gesenkt werden. Nach Abschluss der Optimierungsphase im Jahr 2024 konnte GOTEC die CO₂-Äquivalenzproduktion weiter auf 2,89 kg pro Stück reduzieren, was eine 89,1-prozentige Reduktion im Vergleich zum HVOF-Verfahren bedeutet.

Die Stoff- und Energiebilanzen bestätigten die Effizienzgewinne der neuen Produktionstechnologie, und die Umweltbilanz zeigte eine erhebliche Reduktion der schädlichen Emissionen. Der Einsatz der neuen Technologie hat nicht nur den CO₂-Ausstoß verringert, sondern auch den Ressourcenverbrauch optimiert, was einen positiven Beitrag zum Klimaschutz und Ressourcenschutz leistet.

The project was successfully implemented. CO₂ emissions were significantly reduced compared to conventional processes. While the traditional HVOF coating in 2020 emitted 26.82 kg of CO₂ per brake disc, this value was reduced to 3.97 kg of CO₂ per unit with the Wecodur coating. After completing the optimization phase in 2024, GOTEC was able to reduce the CO₂ equivalent production to 2.89 kg per disc, representing a 89.1% reduction compared to the HVOF process.

The material and energy balances confirmed the efficiency gains of the new production technology, and the environmental balance demonstrated a significant reduction in harmful emissions. The use of the new technology not only reduced CO₂ emissions but also optimized resource consumption, contributing positively to climate protection and resource conservation.

6. **Ausblick / Prospects**

Die industrielle Implementierung des EHLA-Verfahrens hat in der Praxis zahlreiche Herausforderungen mit sich gebracht, insbesondere im Hinblick auf die Prozessstabilität. Jedoch konnten durch gezielte Verbesserungen der Prozessstabilität und -komponenten Lösungen gefunden werden, die in der Serienproduktion angewendet werden können. Langfristig wird erwartet, dass die Technologie nicht nur in der Bremsscheibenproduktion, sondern auch in anderen industriellen Bereichen wie der Windkraft- und Stahlindustrie Anwendung finden wird.

Die Technologie hat bereits das Potenzial, den Marktstandard zu setzen, und wird auch von anderen Maschinenherstellern übernommen. Ein weiterer Ausbau des Verfahrens auf andere verschleißbeständige Teile wird in naher Zukunft erwartet.

The industrial implementation of the EHLA process brought numerous challenges, particularly in controlling the process stability. However, targeted improvements in process stability and components led to solutions that can now be applied in serial production. In the long term, it is expected that the technology will be used not only in brake disc production but also in other industrial sectors such as wind energy and steel industries.

The technology has already established itself as a potential market standard and is being adopted by other machine manufacturers. Further expansion of the process to other wear-resistant parts is expected in the near future.

7. Literatur

1 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/spezifische-emissionsfaktoren-fuer-den-deutschen>; Zugriff 04.11.2020

2 Finkus, Frauke.

EHLA-Forscherteam gewinnt renommierten Berthold Leibinger Innovationspreis 2018, In: Blechnet 2018, <https://www.blechnet.com/ehla-forscherteam-gewinnt-renommierten-berthold-leibinger-innovationspreis-2018-a-740578>, Datum des Abrufs: 14.11.2020

3 Schmidtke, Klaus

Gewinner Stahl-Innovationspreis 2018; Wirtschaftsvereinigung Stahl, Im Internet: <https://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahlanwendung/stahl-innovationspreis/stahlbauteile-mit-ehla-effizient-beschichten>, Datum des Abrufs: 14.11.2020

4 Schopphoven, Thomas et al,

Laserbeschichtung von Bremsscheiben mit angepasster Fertigbearbeitung

VDI-Z Ausgabe 7/8-2019. S.48 ff

5 N.N. / Porsche AG

Neue Bremsscheibe reduziert die Feinstaubbelastung um 90%

<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/fahrzeugbau/neue-bremsscheibe-reduziert-die-feinstaubbelastung-um-90/> Zugriff: 13.11.2020

// DRIVE WELL WITH US!



6 Schopphoven, Thomas

Coating of Brake Discs through extreme high-speed laser material deposition

Vortrag EUROBRAKE 2019, Dresden, 22.05.2019

7 Strauß, Wilfried

Coated rotors for the use in electrical vehicles with regards to CO2 and fine dust emission reduction; Vortrag EUROBRAKE 2019, Dresden, 23.05.2019

8 Interview mit Frank Ottofüllung, Galvanotechniker und -meister, Dr.-Ing. Max Schlötter GmbH & Co. KG, 07.09.2020

9 Interview Dipl.-Phys. Kerstin Ernst, Leiter F&E, Putzier Oberflächentechnik GmbH, 31.09.2020

10 Werksangaben Oerlikon, https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO0008.7_HVOFSolutions_DE.pdf&download=1, Zugriff 13.11.2020

11 Werksangaben HPL Technologies GmbH, Interview mit Hr. Dr.-Ing. Phillip Utsch, 01.10.2020

12 Werksangaben GTV Verschleißschutz GmbH, https://www.gts-ev.de/Download/ti/GTSTI_04_Auto.pdf Zugriff, 16.11.2020

13 IKA-Studie zur CO2-Emissionsreduktion im Auftrag des BMWI: https://www.bmwi.de/Redaktion/Migration/DE/Downloads/Publikationen/co2-emissionsreduktion-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen-nach-2020-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1, Letzter Zugriff 16.11.2020

14 <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-ehla>, Letzter Zugriff 19.05.2025

15 Pawlowski, L. T. (2008).

The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. . Wiley.