

Schlussbericht zum BMW Vorhaben 03EE3061A

Automatisierte und KI-überwachte Herstellung thermisch gespritzter Offshore- Beschichtungen

Teilprojekt Linde GmbH

**Erforschung von Prozessparametern mit Hilfe von
Diagnostiksystemen zur Applikation von Gleitlagerbeschichtungen
mittels HV-LDS**

Linde GmbH

Werner Krömmer

2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren



Automatisierte und KI-überwachte Herstellung thermisch gespritzter Offshore- Beschichtungen

Teilprojekt

Erforschung von Prozessparametern mit Hilfe von
Diagnostiksystemen zur Applikation von Gleitlagerbeschichtungen
mittels HV-LDS

Linde GmbH

Carl von Linde Straße 25

85716 Unterschleißheim

Werner Krömmer

Förderkennzeichen

3EE3061A

Gefördert durch:

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung zum Vorhaben	4
I.1	Aufgabenstellung	4
I.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.4	Stand der Wissenschaft und Technik	7
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
II.	Eingehende Darstellung	11
II.1	Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse	11
II.1.1	Anpassung des Diagnostiksystems PFI an den Lichtbogenprozess	11
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	18
II.4	Voraussichtlicher Nutzen – insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes	19
II.5	Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	20
III.	Erfolgskontrollbericht	20
III.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen	20
III.2	Technische Erfolgsaussichten	21
III.3	Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben	21
III.4	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	22
III.5	Kosten und Zeitplanung	22

I. Kurze Darstellung zum Vorhaben

I.1 Aufgabenstellung

Thermisch gespritzte Gleitlager zeigen bereits in einigen Anwendungen Ihre Vorteile, jedoch ist die Werkstoffauswahl und die Schichtqualität je nach Einsatz unterschiedlich gelagert. Im Bereich der Offshore-Anwendung sind es dabei neben den Gleiteigenschaften auch die Korrosionsbeständigkeit und die Anpassung an die Massen, die hier bewegt werden. Dabei ist es wie bei allen Anwendungen in diesem Bereich besonders wichtig, diese Eigenschaften reproduzierbar herstellen zu können. Eine besondere Herausforderung dabei ist es die gewünschte Festigkeit, basierend auf den Materialeigenschaften des Drahtes, zu behalten oder zu verbessern, so dass man in Vergleich zu Lagerbuchsen die Vorteile einer Schicht voll nutzen kann. Hier spielt zum einen die kostengünstige LDS oder HV-LDS Technologie eine Rolle ebenso wie die richtigen Prozessparameter und Prozessgase, die im Idealfall während des Prozesses durch geeignete KI angepasst und verändert werden können. Bei Linde vorhandene Online Diagnostiksysteme können dabei verwendet werden die KI mit Daten zu versorgen die dann den Prozess kontrollieren und verbessern aber auch geeignete Parameter reproduzierbar an die Partner weiterzugeben. So ist zum Beispiel zum Grundwerkstoff hin eine dichte tragfähige Schicht von Vorteil und an der Oberfläche zum Gegenläufer ein geringer Porenanteil, um als Schmiermitteltasche wirken zu können. Im Falle von Gleitlagern wurde bereits erfolgreich nachgewiesen, dass der Einsatz von TS-Beschichtungen für hochbelastete Gleitlageranwendungen, wie der Hauptlagerung von Windenergieanlagen, möglich ist und Potenzial zur Reduzierung der Herstellungskosten und zur Steigerung der Lebensdauer verspricht Gegenüber Wälzlagern ergeben sich zudem enorme Vorteile bezüglich der Wartungskosten großer Bauteile wodurch insbesondere horrenden Kosten bei Schadensfällen auf See vermieden werden sollen.

Im Rahmen des beantragten Forschungsprojekts sollen daher die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern und Werkstoffen untersucht werden. Dabei wird insbesondere das neuartigen Hochgeschwindigkeits-Lichtbogendrahtspritzen (HV-LDS) betrachtet. HV-LDS-Schichten haben eine breitere Parametermöglichkeit von sehr dichten Schichten bis hin zu definierten Porenanteilen. Dazu soll das Prozessgas an die Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaften angepasst und Parameter für die neu entwickelten Füll- und oder Massivdrähte entwickelt werden. Zusätzlich wird die Entwicklung mittels KI unterstützt, um so Prozessschwankungen präzise zu erkennen sowie geeignete Maßnahmen für eine stabile Prozessführung und eine somit hohe Schichtqualität für besonders kritisch zu wartende Offshore-Anwendungen zu treffen.

I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde

Durch das zusammenarbeitende Konsortium wurde die gesamte Wertschöpfungskette der Produktion von beschichteten Oberflächen für Gleitlager, von der Werkstoffherstellung über die Zerstäubergase bis zur wissenschaftlichen Expertise abgedeckt. Dies macht ein derart komplexes Projekt erst möglich und wäre von den einzelnen Partnern alleine nicht zu bewerkstelligen.

Die Grillo-Werke AG ist ein weltweit agierender Hersteller von Zinkprodukten und Schwefelchemikalien. Der Geschäftsbereich Metall produziert Fertigprodukte und Halbzeuge aus Zink und dessen Legierungen. Die Forschung und Entwicklung entwickelt für die Geschäftsfelder neue Werkstoffe und Produkte. Neue Drahtlegierungen oder Bandqualitäten zur Fülldrahtherstellung können im Labormaßstab erzeugt und untersucht werden und werden in anschließenden Schritten auf den Produktionsmaßstab umgesetzt.

Die Krebs Korrosionsschutz GmbH ist seit Jahren ein in Deutschland führender Anbieter für anspruchsvolle Korrosionsschutzdienstleistungen an Großstrukturen im Bereich der Windenergie. Durch mannigfaltige Anforderungen an den Korrosionsschutz, speziell an Gründungsstrukturen von Offshore-Anlagen hat die Krebs Korrosionsschutz GmbH große Erfahrungen mit der Verarbeitung unterschiedlichster Korrosionsschutzsysteme.

Der Geschäftsbereich Linde Gas der Linde GmbH ist in Deutschland und Europa führender Industriegaseproduzent und einer der bedeutendsten weltweit. Die Linde GmbH befasst sich zudem mit der Erforschung und Entwicklung des Thermischen Spritzens. So wurde in den vergangenen Jahren der Einsatz unterschiedlicher Gase erforscht, die den Beschichtungsprozess verbessern bzw. innovative Schichten produzieren, die bisher mit herkömmlichen Zerstäubergasen nicht möglich waren.

Die Miba Industrial Bearings Germany GmbH ist ein führender Anbieter für Gleitlager. Seit 2008 werden sehr erfolgreich Gleitlagerlösungen für Windenergieanwendungen entwickelt, welche 2019 erstmals in Großserienanwendungen zum Einsatz kamen und mittelfristig die herkömmlichen Wälzlagerantriebe ablösen. Die Kernkompetenzen liegen dabei in der Werkstoffentwicklung und Auslegung tribologischer Systeme gepaart mit dem für die Serienfertigung notwendigen Know-how und Anlagenkapazitäten.

Der inhabergeführte Lohnbeschichter Plasmatic Franken GmbH verfügt über ca. 30 Jahre Erfahrung in der anwendungsspezifischen Entwicklung thermisch gespritzter Beschichtungen sowie deren Applikation mit allen etablierten TS-Verfahren. Zu den Kernkompetenzen zählen, neben der Regeneration verschlissener Bauteile, tribologisch angepasste Beschichtungen sowie Beschichtungen zur elektrischen Isolation von Wälzlagern und zur Reibungsreduktion in Gleitlagern.

Die FURTHRresearch GmbH & Co. KG ist ein Spin-off der RWTH Aachen und bietet Software für das Forschungsdatenmanagement. Ziel ist es, durch effiziente Datenhandhabung, -speicherung und Dokumentation den Umgang mit Daten einfach, zuverlässig und transparent zu machen. Die Software wurde bereits verwendet, um Forschungsdaten zur Membranentwicklung einem neuronalen Netz als Trainingsset zur Verfügung zu stellen, um entsprechende Herstellungsparameter vorherzusagen.

Die Philipps-Universität Marburg (UMR) ist ein renommiertes Wissenschaftszentrum für praxisnahe Forschung und Lehre. Die Arbeitsgruppe an der UMR bringt die notwendigen Kernkompetenzen in den Bereichen künstliche Intelligenz, skalierbare Analyseverfahren und effiziente Datenmanagementsysteme mit. Die jüngsten Arbeiten beschäftigen sich u. a. mit den Themen intelligente Mustererkennung maschinelles Lernen und Datenstrom- und Zeitserienanalyse.

Der Lehrstuhl Zuverlässigkeit und Sicherheit elektronischer Systeme am Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik GS der Universität Rostock hat bereits in früheren Projekten Kompetenzen bei der Oberflächen-Rissanalyse an Gründungsstrukturen für Offshore-Windanlagen und der in situ-Korrosionsüberwachung aufgebaut. Hierzu wurden

neue Sensor- und Messprinzipien entwickelt und die ermittelten Daten mit Proben aus Feld- und Laborversuchen evaluiert.

Das Institut für Oberflächentechnik IOT ist Teil der RWTH Aachen und ein führendes Institut in der Beschichtungstechnik. Zu den einzelnen Technologien werden werkstoffwissenschaftliche Grundlagen erarbeitet und von der Projektidee bis hin zur Nullserienfertigung umgesetzt. Zudem ist das IOT u. a. am Exzellenzcluster „Internet of Production“ der RWTH Aachen beteiligt, um produktionstechnische Modelle in datengetriebenen KI-Methoden zu integrieren.

In Arbeitspunkt 5 sollen geeignete Prozessparameter für die Beschichtungsprozesse LDS und HV-LDS für unterschiedliche Werkstoffe erarbeitet werden

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Arbeitspunkt 2 werden eigene und fremde Sensorik für Spritzversuche aufgebaut. Diese soll unter unterschiedlichen Bedingungen mit unterschiedlichen Systemen getestet, Grenzwerte ermittelt und die Zusammenhänge unterschiedlicher Systeme und geeigneter Werte für die KI ermittelt werden.

Im Rahmen der Versuche wird unterschiedliche Sensorik aufgebaut und mit den verschiedenen Lichtbogenanlagen getestet. Abhängig zur Eignung der Sensoren sollen eventuelle Anpassung an die Prozesse vorgenommen werden, um Einflüsse der Lichtbogenprozesse auf die Sensorik zu ermitteln und nach Möglichkeit abzustellen. Als Bewertungskriterium werden die Signale und Messwerte verwendet und mit Referenzwerten oder Erfahrungswerten abgeglichen. Basierend auf diesen Werten soll dann eine geeignete Datenbankstruktur erstellt werden

Die Weitergabe von Erkenntnissen soll schnellstmöglich in alle AP erfolgen, um die Vorgaben für die Werkstoffauswahl, relevante Messbereiche, Genauigkeiten und zulässige Toleranzen frühzeitig in alle Arbeiten einbinden zu können. Außerdem sollen die Anforderungen an die Messgeschwindigkeiten erfasst werden, um im Prozess schnellgenug reagieren zu können und die Bereitstellung der aussagekräftigsten Daten zu gewährleisten. Nach der Vorauswahl der passenden Messmethoden und Sensoren, werden diese anhand von Werkstoffen aus AP3, die vom Projektpartner zur Verfügung gestellt werden, unter Laborbedingungen auf ihre Eignung getestet und vergleichend bewertet. Dabei werden auch die rauen Umgebungsbedingungen des industriellen Beschichtungsprozesses berücksichtigt

In Arbeitspunkt 5 werden geeignete Prozessparameter für die Beschichtungsprozesse LDS und HV-LDS für unterschiedliche Werkstoffe erarbeitet

In diesem Arbeitspaket werden Proben für weiterführende Untersuchungen hergestellt. Dabei sollen sowohl mittels HV-LDS beschichtete als auch mittels LDS beschichtete Proben untersucht werden.

Die komplexen Zusammenhänge zwischen Spritzparametern, Partikeleigenschaften und die daraus resultierenden Schichteigenschaften spielen wegen der hohen Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der abgeschiedenen Schichten und an die Stabilität des Spritzprozesses eine übergeordnete Rolle. Zunächst muss somit klar abgegrenzt werden, welche Anforderungen an die applizierte Schicht gestellt werden. Eine maßgeschneiderte Schicht ist

maßgeblich vom Zusammenspiel der Anlagentechnik, der Gasparameter und Zusammensetzung und den jeweiligen Spritzwerkstoffen abhängig

In Arbeitspaket 6 werden geeignete Prozessparameter für die Beschichtungsprozesse LDS und HV-LDS für unterschiedliche Werkstoffe aus AP 3 erarbeitet

Es werden Konzepte für den Transfer in die industrielle Fertigung entwickelt und entlang der exemplarischen Fertigungsketten für den Test-Case zwischen Grillo → Plasmatic → Miba implementiert. Linde unterstützt dabei den Transfer auf größere Testbauteile mittels Prozessdiagnostik.

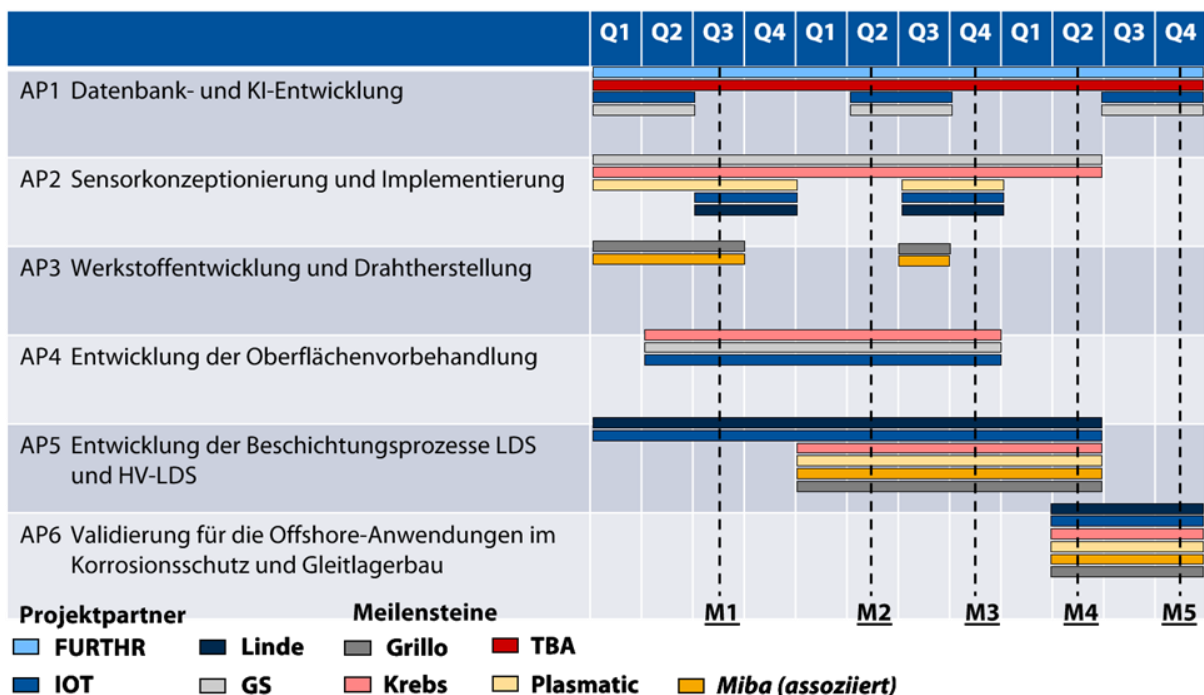


Abbildung 1: Übersicht zu den geplanten Arbeiten

I.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Einsatz unterschiedlicher Gase, die den LDS-Prozess verbessern bzw. innovative Schichten produzieren, wird bei Beschichtungen, die eine gute Leitfähigkeit oder gute Korrosionseigenschaften erfordern, erfolgreich eingesetzt. Da das Zerstäubergas einen signifikanten Einfluss auf das Spritzergebnis und den Spritzprozess hat, wurden Versuche angestellt, welche neben dem für das Schmelzen von Stählen als inert anzusehenden Schutzgas Stickstoff auch unterschiedliche Gasmischungen mit Brenn- und Plasmagasen zur Anwendung kamen. Durch die Verwendung von Stickstoff oder alternativen Zerstäubergasen an Stelle von Druckluft kann sowohl der Abbrand von Kohlenstoff stark reduziert werden, was eine nennenswerte Einflussnahme auf die Härte der Schicht hat, als auch der Sauerstoffgehalt stark herabgesetzt werden, wie in Abb. 2 zu sehen, was maßgeblich die Korrosionsbeständigkeit beeinflusst. Die Zugabe von Brenngasen zum Stickstoff, zeigt eine Steigerung des Kohlenstoffgehalts in der Schicht, und sorgt zusätzlich für Einfluss auf die Schichthärte, wie auch evtl. für bessere Gleiteigenschaften.

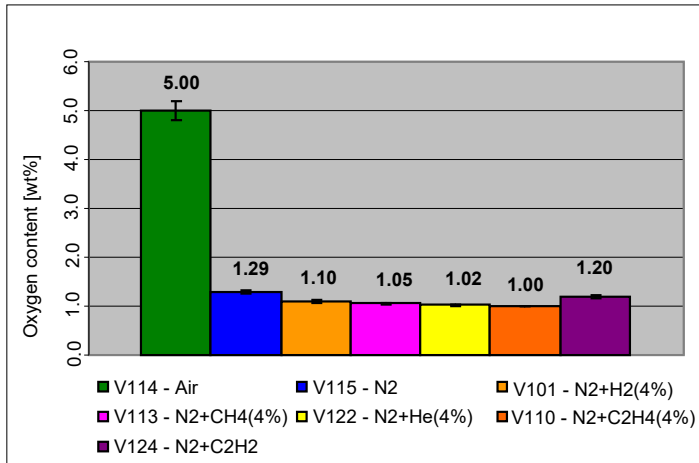


Abbildung. 2: Sauerstoffgehalt bei 13% Cr Stahl in Abhängigkeit verschiedener Brenn- / Plasmagasen

Ebenso kann durch eine Substitution von Druckluft durch Stickstoff oder alternativen Zerstäubergasen die Partikelgröße stark beeinflusst werden, was sich wiederum auch auf die Porosität der Schichten auswirken kann. Durch Beimischung von Brenn- und Plasmagasen zum Stickstoff ist z.B. eine weitere Verschiebung des Partikelgrößenspektrums in Richtung größerer Spritzpartikel realisierbar, siehe Abb. 3. Somit konnte gezeigt werden, dass mit speziellen Gasgemischen als Zerstäubergas beim Lichtbogenspritzen sowohl die mechanischen als auch die metallurgischen Schichteigenschaften und vor allem die Partikeleigenschaften gezielt zu beeinflussen sind.

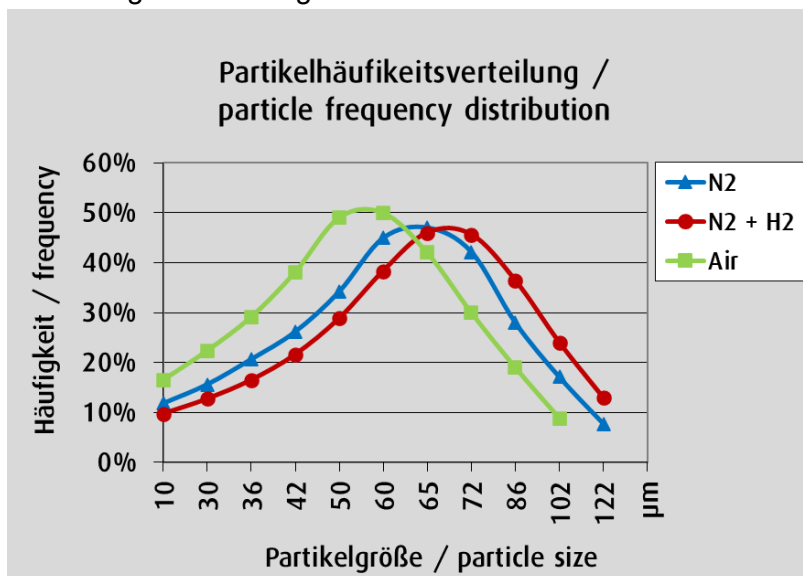


Abbildung 3: Partikelverteilung bei unterschiedlichen Zerstäubergasen

Die Schichtstruktur einer thermisch gespritzten Schicht wird maßgeblich durch die Eigenschaften der Spritzpartikel beeinflusst. So wirkt sich Größe und Beschaffenheit ebenso wie Temperatur, Geschwindigkeit und Oxidationsgrad der einzelnen Partikel auf die Schicht aus.

Die Diagnostik stellt derzeit unterschiedliche Möglichkeiten da. Eine quantitative Aussage zum Beispiel über die Form des Partikelstrahls und der Leuchtdichte ermöglicht es Parameter zu

kontrollieren bzw. zu transferieren. Grundlage des Verfahrens sind zwei Standard LINSPRAY® PFI Process Monitoring Systeme (PFI) der Firma Zierhut Messtechnik GmbH.

Das PFI- Verfahren erfasst die charakteristischen Leuchtdichteverteilungen des Heißgas- und des Partikelstrahls. Bereits kleine Veränderungen der Eingangsgrößen beeinflussen diese Leuchtdichteverteilung und können detektiert werden. Das Verfahren ist eine passive optische Volumendiagnostik, mit der gleichzeitig sowohl der stark leuchtende Gasstrahl in der Nähe des Brenners, als auch der weniger intensiv leuchtende Partikelstrahl in der weiter stromabwärts gelegenen Zone mit einer CCD- Kamera abgebildet wird. Ein PC reduziert die in den Bildern des Gasstrahls und Partikelstrahls vorhandenen Informationen durch Zuordnung von Ellipsen, deren Beschreibungsgrößen den aktuellen Zustand des Beschichtungsprozesses charakterisieren (Abb 4).

Für einen vorab definierten, optimalen Prozess werden die Ellipsendaten als Vergleichswert (Referenz) gespeichert und mit den aus dem laufenden Prozess permanent neu ermittelte Ellipsendaten verglichen. Durch den schnellen Bildvergleich über die Ellipsenparameter lässt sich damit in-situ eine qualitative Prozessüberprüfung ohne weitere Informationen über den Prozess durchführen und man erhält sofort ein IO bzw. NIO.

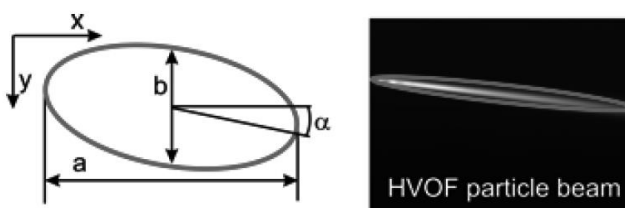


Abbildung 4.: Links Ellipsencharakteristika (Ergebnisgrößen) des PFI- Verfahrens, rechts: typisches Bild eines HVOF- Prozesses mit einbeschriebener Ellipse

Eine Aussage über die Geschwindigkeit der Partikel ist z.B. mit dem Verfahren PIV Particle Image Velocity möglich. Hier werden Teilbereiche des Partikelstrahls von etwa 30 mm abgebildet (Abb.: 5), die typischerweise bei unterschiedlichen Distanzen vom Brenner aus abgescannt werden. Auf diese Weise kann die maximale Partikelgeschwindigkeit abhängig von der Distanz zum Brenner erfasst, oder bei einer Parameterkontrolle diese immer wieder vor dem Beschichtungsprozess kontrolliert werden.

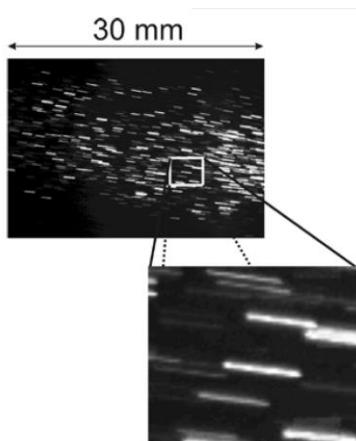


Abbildung 5.: Mit PIV aufgenommene Partikelbilder zur Ermittlung der Geschwindigkeit

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit der Fa. Grillo AG zeichnete sich durch die dort große Erfahrung der Grillo AG bei der Verarbeitung von Zink und Zinklegierungen aus und die vorhandene Marktübersicht welche Drahtdimensionen im Markt verwendet werden.

Als sehr bereichernde Kooperation hat sich die Zusammenarbeit mit der Fa. Krebs bewährt. Die Erfahrungen mit Arbeiten für Offshore Anlagen und Großen Bauteilen sind für das Projekt unerlässlich und mussten immer mit in Betracht gezogen werden.

Die Erfahrung der Firma Miba Industrial Bearings Germany GmbH bei Gleitlagern und Werkstoffen, besonders in Bezug auf Schwerlastausführungen wie im Bereich Wind Energie benötigt hat die Gruppe sehr unterstützt und die Anforderungen die hier gestellt werden auf den Punkt gebracht.

Der Lohnbeschichter Plasmatic Franken GmbH mit über ca. 30 Jahre Erfahrung in der anwendungsspezifischen Entwicklung thermisch gespritzter Beschichtungen besonders vor dem Hintergrund neue Bauteile zu Fertigen ist hat auch die Sichtweise des Mittelstandes perfekt eingebracht. Die Flexibilität des Unternehmens sich schnell auf neue Gegebenheiten einzustellen ist ein wichtiger Baustein um bei Themen der Integration in die Produktion sehr wichtig waren.

Die Philipps-Universität Marburg (UMR) zeigte sich als renommiertes Wissenschaftszentrum für praxisnahe Forschung und Lehre in den Kernkompetenzen für künstliche Intelligenz. Gerade der Hintergrund nicht aus der Szene der Beschichter zu kommen und keine Erfahrung hinsichtlich Thermisches Spritzen zu haben lies uns vieles hinterfragen und neu überdenken hinsichtlich Relevanz einzelner Parameter und deren Einfluss auf die KI

Das Institut für Oberflächentechnik IOT ist Teil der RWTH Aachen und ein führendes Institut in der Beschichtungstechnik. Zu den einzelnen Technologien werden werkstoffwissenschaftliche Grundlagen erarbeitet und von der Projektidee bis hin zur Nullserienfertigung umgesetzt. Zudem ist das IOT u. a. am Exzellenzcluster „Internet of Production“ der RWTH Aachen beteiligt, um produktionstechnische Modelle in datengetriebenen KI-Methoden zu integrieren.

Die bisherige intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Linde und der Arbeitsgruppe Thermisches Spritzen am IOT der RWTH Aachen Institut für Werkstofftechnik wurde im Rahmen dieses Vorhabens weiter intensiviert. Regler Austausch fand bei der Entwicklung geeigneter Prozessparametern statt und hier besonders bei der Auswertung der Ergebnisse die dann in die weitere Parameterfindung mit eingegangen sind.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

II.1.1 Anpassung des Diagnostiksystems PFI an den Lichtbogenprozess

Erste Versuche mit Standardwerkstoffen zeigten bei der Verwendung mit Zink sehr schlechte Ergebnisse, da im Vergleich zu Werkstoffen mit höheren Schmelztemperaturen das erforderliche Eigenleuchten der Partikel bei den Niedrigschmelzenden Werkstoffen wie Zink nur sehr gering ist. Um mit dem Diagnostiksystems PFI (Particle Flux Imaging) numerisch brauchbare Daten zu bekommen und sauber erfassbare Ellipsen zu beschreiben muss das System den gesamten Spritzstrahl erfassen können und Daten sowohl aus dem Lichtbogenbereich als auch aus dem Partikelfreistrahl bekommen, letzteres war mir der aktuellen Konfiguration nicht möglich wie in Abbildung 6 zu sehen ist

Bei den Niedrigschmelzenden Werkstoffen muss hier das Kamerasystem angepasst werden, um mehr Aussagekraft zu bekommen. Unser aktuelles System liefert hier numerische Werte über den Partikelfreistrahl die bei geringen Parameteränderungen zu großen Abweichungen ergeben und nicht reproduzierbar sind. Identische Bilder und damit vergleichbare Werte bei identischen Parametern sind aber essenziell für dieses System und sind bei anderen Werkstoffen ohne Probleme machbar

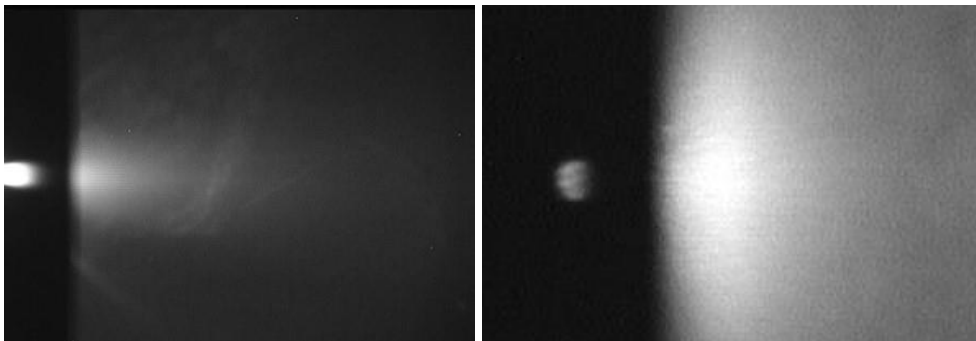


Abbildung 6.: PFI-Bilddaten mit zu geringer Aussage im Partikelfreistrahl

Ursache dieser starken Differenzen in den erfassten Bildern ist die nur durch optische Filter begrenzte Möglichkeit die starken Differenzen des sehr hellen Lichtbogens und des weniger leuchtintensiven Partikelfreistrahls von einander abzugrenzen. Der komplexe Aufbau inklusive der optischen Filter (siehe Abb. 7.) machen das System zudem sehr anfällig für Verschmutzungen die beim Lichtbogenspritzen infolge des Over-Sprays, besonders bei dem sehr leicht anhaftenden Zinkwerkstoffen ein weiteres Problem darstellt.

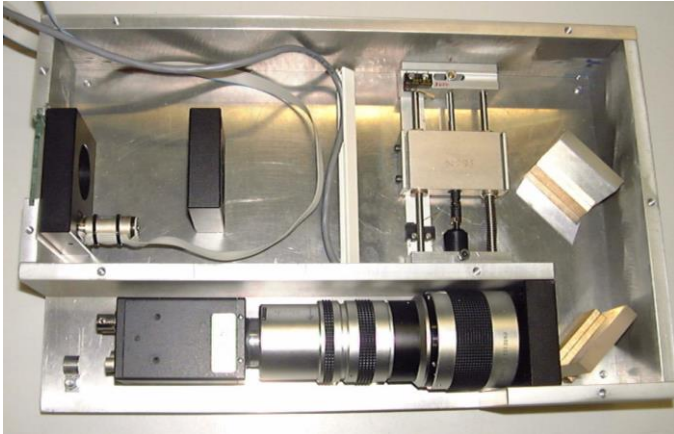


Abbildung 7: Aufbau des vorhandenen PFI Systems

Aufgrund der oben beschriebenen negativen Einflussgrößen und der daraus resultierenden Probleme wurde das vorhandene PFI durch eine neue Kamera ersetzt (siehe Abb. 8.), die es über eine integrierte Software ermöglicht unwichtige Bereiche auszublenden und das Augenmerk auf wesentliche Parameter zu fixieren. Zusätzlich werden die Graufilter durch digitale Filter ersetzt, die eine wesentlich feinere Abstufung ermöglichen und für den sehr hellen Teil des Lichtbogens und den Partikelfreistrahl mit einem geringeren Leuchten getrennt voneinander einstellbar sind. Dadurch grenzt man die Datenmenge ein und ermöglicht eine schnellere Auswertung. An CuAL-Lagerwerkstoffen, die durch Lichtbogenspritzen verarbeitbar sind, konnte das System getestet werden.



Abbildung 8.: Neues PFI-Kamerasystem

Vergleicht man die Bilder, die mit dem alten System aufgenommen wurden, mit denen des neuen Systems, zeigt sich deutlich, dass das neue System eine bessere Bildqualität liefert. Durch die moderne Technik besitzt das neue System ein größeres Belichtungsspektrum, wodurch sich Details präziser erfassen lassen. Dies führt zu einer verbesserten Fähigkeit, die durch einen Algorithmus beschriebenen Ellipsen genauer abzugrenzen und darzustellen. Die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse konnten ebenfalls optimiert werden, da das neue System stabilere und konsistentere Ergebnisse liefert. (siehe Abb. 9.)

Darüber hinaus wurde der mobile Einsatz des Systems geprüft. Dank der weitreichenden Veränderungen, insbesondere der Integration einer neuen, kleineren Kamera, ist das mobile Arbeiten mit dem System deutlich einfacher und praktischer geworden. Während das alte System durch die größere und weniger handliche Kamera mobil schwerer nutzbar war, erlaubt die kompaktere Bauweise des neuen Systems einen flexibleren Einsatz an verschiedenen Standorten.

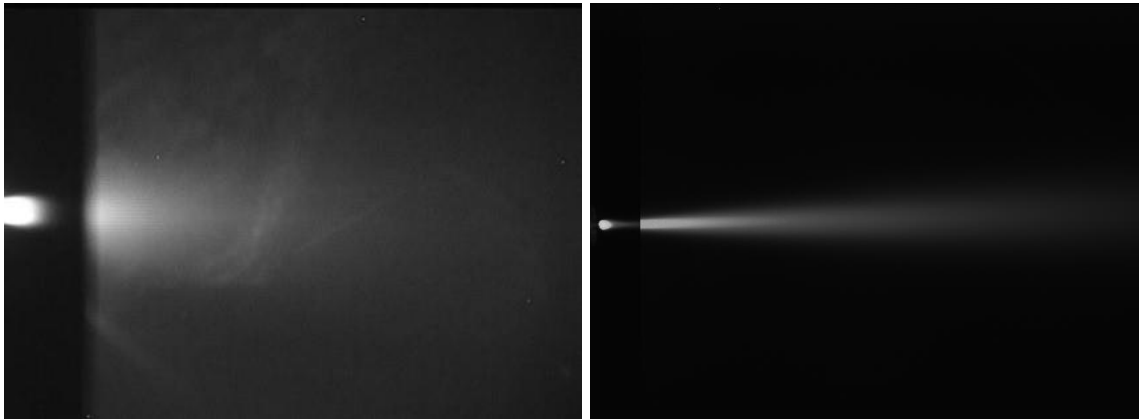


Abbildung 9.: PFI-Bilder links altes System rechts neues System

Um die Machbarkeit und Qualität des neuen Systems zu testen, wurden gezielte Versuche durchgeführt, die entscheidende Aspekte der Funktionalität und Genauigkeit beleuchten sollten. Ein zentraler Bestandteil dieser Untersuchungen war die Aufnahme eines Referenzbildes, welches mithilfe zuvor ermittelter Standardparameter erstellt wurde. Dieses Referenzbild dient als Basis für die weitere Analyse und ermöglicht eine systematische Bewertung der Leistungsfähigkeit des Systems unter kontrollierten Bedingungen.

Zur genauen Analyse und besseren Visualisierung der Leuchtdichteverteilung wurde das Referenzbild in Falschfarben dargestellt. Diese Methode ist besonders effektiv, da sie die unterschiedlichen Leuchtdichteverteilungen deutlich erkennbar macht und dadurch auf einfache Weise nutzbare Bereiche innerhalb des Bildes identifiziert werden können. Die Darstellung in Falschfarben stellt somit ein Schlüsselement dar, um das Potenzial des Systems zu analysieren und relevante Zonen für weitere Untersuchungen auszuwählen.

Ein weiteres Ziel der Tests bestand darin, die Fähigkeit des Systems zu überprüfen, die durch einen Algorithmus definierten Ellipsen in spezifischen Leuchtbereichen einzuzeichnen. Dies umfasste sowohl die Einzeichnung im Lichtbogen als auch im Partikelfreistrahl. Mithilfe der Software konnten diese Ellipsen präzise in die entsprechenden Bereiche des Bildes eingeschrieben werden. Die erfolgreiche Umsetzung dieser Aufgabe zeigt, dass das System nicht nur in der Lage ist, komplexe Leuchtdichteverteilungen zu erfassen, sondern auch das Ergebnis durch klare geometrische Abgrenzungen weiter zu strukturieren.

Eine exemplarische Ergebnisdarstellung dieser Versuche ist in Abbildung 10 sichtbar. Diese Abbildung veranschaulicht anschaulich die Kombination aus der Falschfarbvisualisierung und dem präzisen Einschreiben der Ellipsen. Die Ergebnisse zeigen, dass das System eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit aufweist, sowohl in der Erfassung der Leuchtdichteverteilung als auch in der Abgrenzung spezifischer Bereiche mittels der Software.

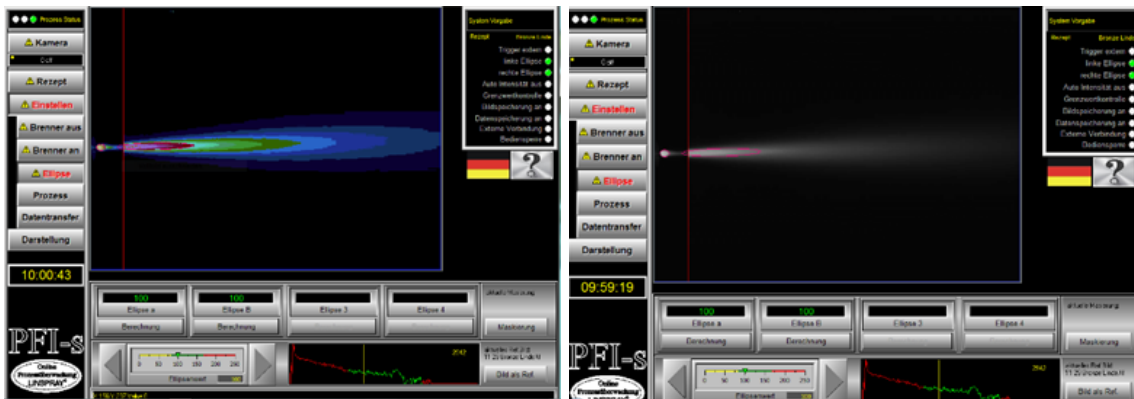


Abbildung 10.: PFI-Falschfarbendarstellung, links und erzeugte Ellipsen, rechts

Im Rahmen der Systemtests wurde ein besonderer Fokus auf die Nutzung der durch die Ellipsen abgeleiteten numerischen Werte gelegt. Diese Werte dienen als Grundlage für einen direkten Vergleich zwischen einem zuvor erstellten Referenzbild und einem aktuellen Bild, das unter veränderten Prozessparametern aufgenommen wurde. Durch diesen Vergleich können Abweichungen in den Parametern präzise festgestellt werden. Dies ist von essenzieller Bedeutung, um potenzielle Fehlerquellen im Prozess frühzeitig zu erkennen und insbesondere fehlerhafte Beschichtungen aktiv zu verhindern.

Die numerisch gewonnenen Daten aus den Ellipsenanalyse-Bereichen werden in standardisierter Form übertragen und direkt zur weiteren Verarbeitung im System verwendet. Das PFI selbst hat damit die Möglichkeit warnschwelle einzustellen bevor der Prozess fehlerhaft arbeitet. Die Analyse der Daten erlaubt es, zwischen einem stabilen Prozessverlauf und signifikanten Abweichungen zu unterscheiden, die durch unterschiedliche Parameterveränderungen entstehen können. Diese Daten sollen dann aber auch an die KI übergeben werden, um diese zu nutzen den Zustand des Prozesses zu bewerten damit neue Erkenntnisse zu gewinnen

Die gewonnenen Werte dokumentieren dabei nicht nur den genauen Zeitpunkt, an dem der Prozess von Stabilität abweicht, sondern bieten auch die Möglichkeit, spezifische Parameterveränderungen eindeutig zu diagnostizieren. Dadurch entsteht ein wertvolles Werkzeug, um präzise Rückschlüsse auf die Ursachen potenzieller Fehler zu ziehen und effektive Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Im Rahmen weiterführender Tests wurde untersucht, wie sich spezifische, gezielt eingebrachte Parameterabweichungen auf den Prozess auswirken. Dazu gehörten unter anderem Änderungen wie eine gezielte Spannungsänderung oder eine Modifikation des Zerstäubergasdrucks. Diese Veränderungen wurden genutzt, um Fehler bewusst zu simulieren und die Auswirkungen auf die numerischen Werte sowie die Stabilität des Systems zu analysieren. Der Vergleich eines stabilen Prozesses mit einem Prozess, der durch solche Variationen beeinflusst wurde, zeigt klar, wie sensibel und präzise das System Abweichungen erkennen kann.

In den Ergebnissen der Untersuchungen wird die Leistungsfähigkeit des Systems hier in folgender Tabelle mit den numerischen Werten der Ellipsen deutlich gemacht. Die Darstellung ermöglicht eine anschauliche Analyse des Prozessverlaufs und hilft, wichtige

Erkenntnisse über die Stabilität sowie die Sensitivität des Systems auf Veränderungen der Prozessparameter zu gewinnen.

Schön zu erkennen ist im oberen Bereich von Tabelle 1 wie viel Zeit benötigt wird, bis der Prozess stabil läuft. Diese Phase markiert die Anpassung und Feinabstimmung der Parameter, bis die idealen Prozessbedingungen erreicht werden. Sobald der Prozess stabil ist, zeigt sich dies durch konstante und reproduzierbare numerische Werte, die aus den analysierten Ellipsen abgeleitet werden.

Im grünen Bereich wird deutlich, wie sich gezielte Änderungen der Spannung in langsamen Schritten von jeweils 0,5 V auf die rechte Ellipse auswirken. Diese feinen Anpassungen wurden bewusst gewählt, um die Sensitivität des Systems gegenüber kleinsten Spannungsschwankungen detailliert zu untersuchen. Mit jeder Spannungsänderung zeigt sich eine sichtbare Veränderung in der Form, Lage und Ausdehnung der rechten Ellipse. Dies unterstreicht die Reaktionsfähigkeit des Systems, das präzise auf selbst geringfügige Modifikationen der Prozessparameter anspricht.

Diese Veränderungen lassen sich nicht nur visuell nachverfolgen, sondern werden mithilfe der numerischen Analyse charakterisiert und quantifiziert. Besonders aussagekräftig sind dabei die Werte des Ellipsenschwerpunkts (x_r) sowie die Länge der Halbachse (a_r), die beide als numerische Indikatoren herangezogen werden. Der Ellipsenschwerpunkt (x_r) beschreibt die horizontale Verschiebung der Ellipse, während die Halbachse (a_r) Aufschluss über die geometrische Ausdehnung liefert.

Die numerische Auswertung zeigt, dass mit jeder Spannungsänderung klare Verschiebungen sowohl im Schwerpunkt (x_r) als auch in der Länge (a_r) sichtbar werden. Dies macht die Sensitivität des Systems nicht nur als qualitative Eigenschaft nachvollziehbar, sondern ermöglicht auch eine objektive, mathematische Bewertung der Prozessveränderungen. Das Verhalten der Werte folgt einem konsistenten Muster.

In Abbildung 11 wird deutlich, wie sich die Eigenschaften der Ellipsen unter verschiedenen Spannungswerten verändern. Die Darstellung zeigt anschaulich die Auswirkungen einer gezielten Spannungsreduktion auf die Geometrie und Position der Ellipsen. Auf der rechten Seite ist der Referenzwert mit einer Spannung von 25 V dargestellt, während auf der linken Seite, auf einem Vergrößerten Ausschnitt die Resultate bei einer reduzierten Spannung von 21 V zu sehen sind.

Die visuelle Analyse zeigt, dass die grüne Ellipse bei der reduzierten Spannung sowohl in ihrer Größe als auch in ihrer Lage zur Referenzellipse in rot verändert ist, die grüne und rote Linie dienen lediglich dem Betrachter als Hilfestellung die beiden Ellipsen und den Unterschied zu kennzeichnen. Im Vergleich zum Referenzwert bei 25 V wird die Ellipse bei 21 V deutlich kleiner. Dies wird sichtbar durch die verkürzte Länge ihrer Halbachsen und die insgesamt kompaktere Geometrie der Ellipse. Die Reduktion der Spannung wirkt direkt auf die physikalischen Prozesse, die den Lichtbogen oder den Partikelfreistrahler erzeugen, und verändert damit die charakteristischen Leuchtdichteverteilungen.

Zusätzlich zur Größenveränderung ist auch eine Verschiebung der Position der Ellipse zu erkennen. Diese wird numerisch durch den Bezugspunkt des Ellipsenschwerpunkts beschrieben. Die Verschiebung des Schwerpunktes und die Reduktion der Halbachsen

verdeutlichen, dass die reduzierte Spannung signifikante Änderungen in der Struktur und Dynamik des Prozesses bewirkt. Diese Veränderungen sind nicht nur visuell erfassbar, sondern auch durch die angeschlossenen numerischen Systeme messbar und quantitativ dokumentierbar. Die Auswertung der numerischen Werte zeigt, wie die Parameter des Ellipsenschwerpunkts und der Halbachsen variieren und damit die Stabilität und Effizienz des Prozesses unter unterschiedlichen Spannungsbedingungen charakterisiert werden können.

Tabelle 1 Veränderung Spannung

*2023.11.29														
*time1	time2	x_l	y_l	a_l	b_l	alpha_l	x_r	y_r	a_r	b_r	alpha_r	spr-angle	process	
10:02:54	0	17,118	255,088	17,287	12,585	0,467	116,16	253,104	140,368	14,282	-1,179	-1,228	1	
10:02:57	2	4,229	-0,165	9,482	-1,38	-2,92	24,602	-0,39	44,431	28,581	-0,133	-1,151	0	
10:02:58	4	19,05	-0,215	52,73	-4,512	-2,857	21,507	-0,247	38,019	27,377	0,074	-0,978	0	
10:03:00	5	18,579	-0,251	47,42	-4,338	-1,133	9,214	-0,1	17,883	12,183	-0,101	-0,859	0	
10:03:02	7	3,459	-0,129	10,038	-0,3	-2,648	18,218	-0,188	33,228	23,2	0,085	-1,02	0	
10:03:04	9	18,581	-0,318	47,816	-6,767	-2,235	17,467	-0,209	32,192	20,616	-0,064	-0,839	0	
10:03:06	11	82,641	0,472	99,907	12,354	2,419	11,844	-0,178	21,899	17,184	-0,116	-2,112	0	
10:03:08	13	21,076	-0,361	49,118	-7,038	-0,528	20,998	-0,199	38,692	23,262	0,088	-0,75	0	
10:03:10	15	28,801	-0,201	75,217	-5,689	0,292	21,706	-0,234	39,319	24,393	0,009	-0,991	0	
10:03:12	17	18,647	-0,213	48,077	-3,563	0,108	22,862	-0,298	40,659	27,525	-0,047	-1,027	0	
10:03:14	19	19,984	-0,254	51,998	-2,948	-0,029	23,655	-0,271	42,591	27,453	-0,065	-0,942	0	
10:03:16	21	6,191	-0,125	18,952	0,954	0,855	22,958	-0,278	40,353	27,607	-0,018	-1,088	0	
10:03:17	22	19,957	-0,169	59,337	-5,336	-0,324	15,576	-0,195	28,05	20,312	-0,135	-1,032	0	
10:03:19	24	2,264	-0,101	16,263	-1,206	2,642	15,335	-0,271	28,595	19,037	-0,263	-1,187	0	
10:03:21	26	1,816	-0,199	15,625	0,166	-0,291	4,609	-0,206	7,932	6,096	-0,3	-1,1	0	
10:03:23	28	-0,814	-0,094	7,128	0,95	4,764	7,61	-0,254	13,707	6,46	-0,29	-1,266	0	
10:03:25	30	6,236	-0,147	25,561	1,49	2,579	10,714	-0,327	18,775	10,163	-0,282	-1,265	0	
10:03:27	32	3,844	-0,151	20,512	0,492	1,9	8,605	-0,291	14,672	9,534	-0,237	-1,234	0	
10:03:29	34	-0,416	-0,142	2,733	-1,356	-0,035	1,367	-0,174	2,203	3,094	-0,301	-1,175	0	
10:03:31	36	8,441	-0,161	24,559	-0,76	-0,218	-0,418	-0,095	-1,408	2,65	-0,175	-1,07	0	
10:03:33	38	-0,687	-0,177	1,866	-1,29	3,553	3,827	-0,152	6,956	3,348	-0,156	-1,061	0	
10:03:34	39	1,492	-0,119	6,631	2,077	1,676	-0,811	-0,116	-1,538	0,942	-0,264	-1,155	0	
10:03:36	41	-1,255	-0,091	2,844	-0,032	1,173	2,065	-0,158	3,21	3,551	-0,258	-1,214	0	
10:03:38	43	-1,787	-0,166	-0,595	0,673	0,22	-2,59	-0,075	-4,004	-1,516	-0,221	-1,041	0	
10:03:40	45	1,71	-0,282	4,237	-2,577	2,133	-3,635	-0,07	-6,423	-0,937	-0,207	-0,875	0	
10:03:42	47	0,286	-0,167	3,473	2,235	-0,626	-0,929	-0,069	-1,734	1,161	-0,143	-1,014	0	
10:03:44	49	4,287	-0,143	17,936	0,935	0,555	6,171	-0,183	10,75	6,081	-0,212	-1,131	0	
10:03:46	51	7,519	-0,208	23,631	0,598	-3,168	4,168	-0,186	6,94	4,585	-0,248	-1,074	0	
10:03:48	53	7,733	-0,117	26,755	-0,188	0,557	5,104	-0,182	9,112	4,707	-0,192	-1,185	0	
10:03:49	54	8,675	-0,175	33,913	-0,353	-0,263	9,991	-0,238	18,811	9,632	-0,331	-1,125	0	
10:03:51	56	2,264	-0,098	14,73	-0,877	3,207	6,602	-0,214	11,506	7,049	-0,264	-1,227	0	
10:03:53	58	1,26	-0,109	11,062	0,259	2,298	8,809	-0,215	15,745	10,745	-0,33	-1,181	0	
10:03:55	60	0,663	-0,102	15,211	1,734	6,278	6,988	-0,221	12,733	5,741	-0,223	-1,223	0	
10:03:57	62	16,891	-0,263	48,925	-10,435	1,63	3,153	-0,178	5,665	4,076	-0,203	-1,013	0	
10:03:59	64	-3,743	-0,143	-11,62	-13,664	5,996	-7,548	-0,077	-14,023	-1,735	-0,328	-1,143	0	
10:04:01	66	6,044	-0,369	5,056	-15,461	4,766	-12,335	0,095	-22,278	1,566	-0,692	-0,549	0	
10:04:03	68	7,114	-0,166	16,295	-17,262	2,007	-16,387	0,019	-30,71	-4,103	-0,212	-1,1	0	
10:04:04	69	7,389	-0,213	7,036	-17,915	5,457	-6,266	-0,068	-11,333	-0,374	-0,257	-1,021	0	
10:04:06	71	0,72	-0,306	-6,648	-13,14	2,018	-13,173	0,014	-24,228	-6,213	-0,286	-0,8	0	
10:04:08	73	3,819	-0,348	-2,101	-15,939	5,875	-21,697	0,161	-40,134	-13,243	-0,019	-0,539	0	
10:04:10	75	2,579	-0,26	-6,099	-20,583	3,228	-19,204	0,052	-34,209	0,566	-0,169	-0,894	0	
10:04:12	77	4,096	-0,191	-1,019	-17,532	-0,644	-17,337	0,077	-31,29	-7,506	-0,12	-0,954	0	
10:04:14	79	-0,426	-0,198	-3,15	-18,301	2,197	-13,201	0,105	-23,799	-7,369	-0,175	-0,829	0	
10:04:16	81	4,424	-0,359	-0,716	-14,796	5,874	-14,385	0,087	-25,986	-8,095	-0,185	-0,597	0	
10:04:17	82	5,559	-0,24	-10,588	-13,351	9,282	-15,507	0,165	-28,089	-2,675	-0,473	-0,685	0	
10:04:19	84	-100	-100	-100	-100	-100	-34,755	0,386	-65,974	-20,545	-0,488	-100	0	

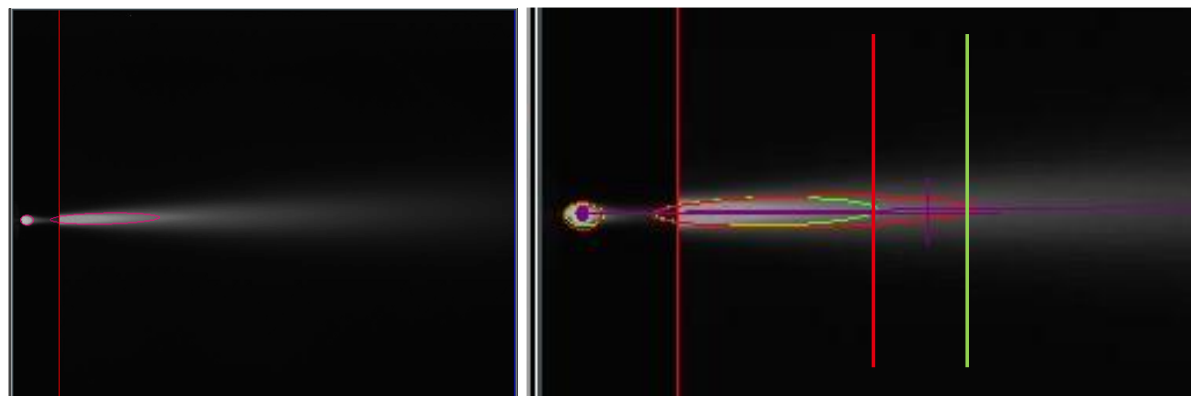


Abbildung 11.: PFI-Bilder inclusive Auswertung durch Ellipsen , links Referenz und rechts Veränderung der Spannung

Ein weiterer Versuch wurde durchgeführt, bei dem gezielt der Prozessgasdruck und damit auch die Menge des eingesetzten Gases verändert wurden, um die Auswirkungen auf den Beschichtungsprozess und die daraus resultierenden Ellipsenwerte zu analysieren. Dieses Experiment diente dazu, die Sensitivität des Systems gegenüber Gasflussvariationen zu untersuchen und gleichzeitig die Fähigkeit des Systems zu überprüfen, die Ursachen der Parameterveränderungen zu identifizieren.

Die Ergebnisse in Tabelle 2 zeigen deutlich, dass sich drei zentrale Parameter der Ellipse durch die Veränderung des Prozessgasdruckes signifikant ändern: der Ellipsenschwerpunkt (x_r), die Länge der Halbachse (a_r) sowie die Länge der Halbachse (b_r).

Der Ellipsenschwerpunkt (x_r) beschreibt die horizontale Position der Ellipse im Bild und reagiert empfindlich auf die geänderte Gasmenge. Eine Veränderung des Prozessgasdruckes beeinflusst die Strömungsdynamik und die Verteilung des Partikelstrahls, was zu einer Verschiebung der Ellipse führt. Diese Verschiebung wird über den Schwerpunkt (x_r) präzise sichtbar und numerisch dokumentiert.

Die Länge der Halbachsen, (a_r) und (b_r), beschreibt die geometrische Ausdehnung der Ellipse in horizontaler beziehungsweise vertikaler Richtung. Eine Änderung der Gasmenge beeinflusst die Geometrie des Partikel- oder Lichtbogenstrahls erheblich, was sich unmittelbar in den Halbachsen widerspiegelt. Die Werte für (a_r) und (b_r) zeigen, wie stark der Strahl entweder komprimiert oder aufgefächert wird. Ein verringerter Prozessgasdruck führt in der Regel zu einer Vergrößerung der Halbachsenlängen, während ein erhöhter Gasdruck zu einem, mehr fokussierten Strahl führt, was sich in einer Reduzierung von (a_r) und (b_r) äußert.

Diese Veränderung, sehr schön in Bild 12 zu sehen, die sich gegensätzlich zu den erwarteten Ergebnissen einstellt, hat dabei zwei Ursachen. Bei einem höheren Druck und dadurch einer höheren Gasmenge kommt es zu einer stärkeren Fokussierung des Strahls und damit einer verstärkten Bündelung der Partikel führt, eine Verringerung führt zu einer Erweiterung des Strahls. Bei einer Reduzierung der Gasmenge verlangsamt sich aber auch das Abkühlverhalten der Partikel und die Geschwindigkeit dieser, was somit zu einer Vergrößerung des sichtbaren Partikelstrahls durch heißere Partikel führt.

Die Analyse der drei Parameter (x_r), (a_r) und (b_r) liefert nicht nur einen klaren Hinweis auf die Veränderung, sondern auch eine Einordnung des Fehlers. Durch die charakteristischen Verschiebungen und Größenänderungen dieser Werte kann eindeutig darauf geschlossen werden, welcher Prozessparameter – in diesem Fall der Prozessgasdruck – verändert wurde. Das System ermöglicht es somit, nicht nur Abweichungen festzustellen, sondern auch deren Ursachen zu identifizieren.

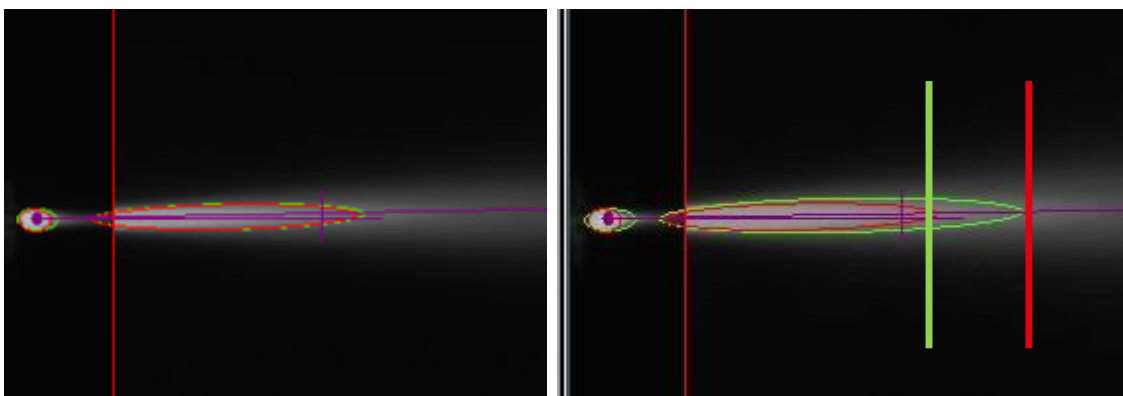


Abbildung 12.: links Referenz rot und grün sind deckungsgleich, rechts die Veränderung mit der größeren grünen Ellipse

Tabelle 2 Veränderung Prozessgasdruck

*2023.11.29	keine	Fehlergrenzen												
*time1	time2	x_l	y_l	a_l	b_l	alpha_l	x_r	y_r	a_r	b_r	alpha_r	spr-angle	process	
*10:07:51	0	17,118	255,088	17,287	12,585	0,467	116,16	253,104	140,368	14,282	-1,179	-1,165	1	
10:07:53	1	5,993	-0,16	26,743	0,734	1,903	5,806	-0,163	9,76	5,488	-0,193	-1,088	0	
10:07:55	3	2,435	-0,138	8,87	2,208	0,369	4,485	-0,183	7,783	4,177	-0,257	-1,156	0	
10:07:57	5	1,606	-0,161	8,602	0,784	1,954	4,221	-0,221	7,253	5,25	-0,382	-1,178	0	
10:07:59	7	0,286	-0,143	11,143	1,67	3,61	2,373	-0,194	3,302	5,564	-0,309	-1,189	0	
10:08:00	9	10,461	-0,157	33,38	-2,289	-0,416	4,643	-0,161	7,886	6,147	-0,055	-1,111	0	
10:08:02	11	2,435	-0,138	8,87	2,208	0,369	3,733	-0,174	6,195	5,194	-0,213	-1,152	0	
10:08:04	13	-1,402	-0,033	6,067	4,02	3,115	0,799	-0,083	0,729	3,016	-0,094	-1,207	0	
10:08:06	14	4,637	-0,106	16,354	2,604	2,138	0,743	-0,066	1,329	1,584	-0,113	-1,087	0	
10:08:08	16	-1,221	-0,133	2,035	0,892	1,689	0,626	-0,132	0,451	3,55	-0,139	-1,134	0	
10:08:10	18	2,011	-0,204	13,302	2,359	0,58	4,081	-0,177	6,635	6,673	-0,165	-1,06	0	
10:08:12	20	-2,198	-0,134	2,835	-0,372	3,09	-4,984	-0,068	-9,234	-1,08	-0,237	-1,111	0	
10:08:14	22	0,604	-0,113	4,925	1,673	1,968	-4,708	-0,08	-8,897	-0,679	-0,259	-1,164	0	
10:08:15	24	2,979	-0,131	13,823	1,813	0,054	0,419	-0,08	0,235	2,662	-0,111	-1,073	0	
10:08:17	26	5,981	-0,199	26,091	-0,36	0,669	1,558	-0,06	2,359	3,065	0,015	-0,935	0	
10:08:19	28	17,907	-0,25	51,09	-1,99	-4,157	13,673	-0,192	24,806	19,324	-0,057	-0,939	0	
10:08:21	29	12,918	-0,164	35,131	0,007	-2,635	16,466	-0,213	30,317	20,898	-0,035	-1,04	0	
10:08:23	31	6,317	-0,175	20,05	1,328	-1,278	10,138	-0,188	17,974	9,096	-0,078	-1,051	0	
10:08:25	33	20,912	-0,219	58,32	-1,457	-2,313	10,709	-0,239	18,849	8,917	-0,114	-1,078	0	
10:08:27	35	27,503	-0,338	75,559	-5,218	-2,378	18,81	-0,172	34,111	22,904	0,05	-0,767	0	
10:08:29	37	20,55	-0,264	54,618	-4,887	-0,998	19,306	-0,194	34,854	24,637	0,115	-0,874	0	
10:08:31	39	18,915	-0,375	52,704	-4,948	-2,561	16,577	-0,203	30,435	21,645	-0,016	-0,768	0	
10:08:32	41	6,944	-0,128	21,508	1,511	-0,619	6,735	-0,142	11,291	7,578	0,016	-1,093	0	
10:08:34	43	12,108	-0,153	34,177	0,1	-1,258	5,696	-0,093	9,27	6,714	0,117	-1,013	0	
10:08:36	45	2,092	-0,096	8,281	0,717	1,681	6,46	-0,111	10,472	7,193	0,092	-1,091	0	
10:08:38	47	5,096	-0,186	16,066	1,435	-3,053	9,563	-0,119	16,026	15,262	-0,014	-0,949	0	
10:08:40	48	4,744	-0,169	16,816	0,776	-1,072	1,374	-0,044	2,067	2,729	0,027	-0,956	0	
10:08:42	50	15,372	-0,109	46,016	-5,206	-1,329	8,848	0,047	15,585	15,591	0,131	-0,852	0	
10:08:44	52	17,507	-0,016	54,163	-8,235	-3,677	18,642	-0,263	33,273	26,925	0,076	-1,27	0	
10:08:46	54	18,685	0,021	52,222	-9,073	-2,695	16,734	-0,18	29,746	31,214	-0,009	-1,239	0	
10:08:48	56	18,393	-0,028	53,505	-8,509	-1,591	18,25	-0,288	32,354	28,341	0,011	-1,293	0	
10:08:49	58	19,366	-0,155	58,89	-7,085	-2,307	16,394	-0,242	28,857	26,591	0,092	-1,099	0	
10:08:51	60	17,28	-0,107	55,599	-7,835	-3,5	18,338	-0,264	32,751	27,664	0,184	-1,161	0	
10:08:53	62	18,77	-0,166	55,518	-7,1	-1,941	16,441	-0,251	29,314	25,949	0,008	-1,095	0	
10:08:55	64	16,374	-0,12	53,053	-6,159	-2,122	17,992	-0,278	32,134	26,986	0,039	-1,165	0	
10:08:57	66	17,056	-0,127	53,762	-5,639	-0,748	17,643	-0,287	31,216	27,615	0,034	-1,173	0	
10:08:59	67	20,552	-0,169	64,541	-8,618	-1,538	4,318	-0,035	10,214	27,439	-0,389	-0,935	0	
10:09:01	69	29,235	-0,045	73,712	-12,33	-0,911	24,306	-0,384	44,091	43,324	-0,133	-1,331	0	
10:09:03	71	27,027	-0,049	71,433	-12,392	-1,597	24,817	-0,465	45,529	44,004	-0,264	-1,412	0	

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel wurden erfolgreich eingesetzt und für folgende Positionen verwendet.

Personalmittel

Hier wurden Arbeiten von Hr. Werner Krömmer zur Unterstützung der Arbeiten des Vorhabens finanziert.

Reisekosten

Die Reisen zu Projektmeetings mit den Projektpartnern wurden, um für die einzelnen Partner die Kosten gering zu halten und gleichmäßig zu verteilen, bei den jeweiligen Partnern im Wechsel durchgeführt bzw. wenn möglich in Telefonkonferenzen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben hat eindrucksvoll gezeigt, dass der Einsatz moderner Diagnostiksysteme, wie dem hier verwendeten PFI, in Kombination mit innovativen Ansätzen der Künstlichen

Intelligenz (KI) die Möglichkeiten der Technologie erheblich erweitern kann. Die Integration smarter KI-Algorithmen erlaubt nicht nur eine genaue Analyse des Prozessgeschehens, sondern bietet auch vielversprechende Perspektiven für intelligenter gestaltete Prozesssteuerungen, die aktiv in den Ablauf eingreifen können. Diese intelligente Automation trägt dazu bei, die Qualität des Prozesses kontinuierlich zu optimieren und potenzielle Fehler bereits im frühesten Stadium zu erkennen und zu korrigieren.

Ein entscheidender Vorteil dieses diagnostischen Ansatzes liegt in seiner Fähigkeit, die Qualitätssicherung lückenlos darzustellen, insbesondere bei großen Bauteilen und Prozessen mit langen Laufzeiten. Je komplexer und zeitaufwendiger der Herstellungsprozess ist, desto wichtiger ist es, eine durchgehende Überwachung und Dokumentation sicherzustellen, um die Produktion fehlerfrei und effizient zu gestalten. Moderne Diagnostiksysteme bieten hier eine technologische Lösung, um die Qualität über den gesamten Ablauf hinweg sicherzustellen und gleichzeitig wertvolle Daten für die Optimierung zu generieren.

Ein weiterer bemerkenswerter Aspekt ist die breite Anwendbarkeit des Systems. Es zeigt sich, dass die Technologie für viele Werkstoffe eingesetzt werden kann, da sie flexibel an unterschiedliche Produktionsanforderungen anpassbar ist und durch die KI leicht anlernbar wird – vorausgesetzt, die grundlegende Struktur des Systems ist etabliert. Diese Adaptionsfähigkeit bietet eine enorme praktische Reichweite und erleichtert die Integration des Systems in bestehende Produktionsumgebungen, unabhängig von den spezifischen Anforderungen der Werkstoffe.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, diese Technologie auf andere thermische Spritzprozesse zu übertragen, wie etwa das Plasmaspritzen oder das HVOF-Spritzen. Allerdings würde dies einen zusätzlichen Aufwand erfordern, insbesondere bei der Zuordnung der relevanten Parameter zu möglichen Fehlern oder Parameteränderungen. Die Identifikation und Definition dieser Parameter ist entscheidend, da die spezifischen Prozessdynamiken je nach Spritzverfahren und Werkstoff variieren. Hierbei könnte eine Vergleichbarkeit mit anderen Messsystemen hilfreich sein, um die notwendigen Informationen zu validieren und die KI entsprechend zu trainieren.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen – insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes

Das Projekt hat gezeigt, dass auch wenn die ursprünglich angedachten Werkstoffe nicht in der Herstellung oder im spezifischen Anwendungskontext realisierbar sind, die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen dennoch von großem Wert sind. Wie bereits erwähnt, bietet der entwickelte Ansatz die Möglichkeit, schnell und effizient an andere Werkstoffe angepasst und angelernt zu werden. Dieser hohe Grad an Flexibilität ist ein zentraler Vorteil des eingesetzten Diagnostiksystems und der Prozessmethodik, da er eine Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten ermöglicht und somit die technologische Weiterentwicklung fördert.

Die Entwicklung neuer Lagerwerkstoffe schreitet kontinuierlich voran, da steigende Anforderungen an Leistung, Haltbarkeit und Wirtschaftlichkeit eine ständige Optimierung verlangen. In diesem Zusammenhang wird das Lichtbogenspritzen als eine bevorzugte Alternative immer wieder in Betracht gezogen. Dabei spielen gleich mehrere Faktoren eine

Rolle, die diesen Prozess so attraktiv machen: Zum einen ermöglicht das Lichtbogenspritzen aufgrund der Verwendung von Draht als Ausgangsmaterial eine besonders schnelle und kostengünstige Produktion. Der Draht ist nicht nur wirtschaftlich in der Herstellung und Lagerung, sondern auch vergleichsweise einfach zu handhaben, wodurch der gesamte Prozess weniger aufwendig gestaltet werden kann.

Darüber hinaus überzeugt das Lichtbogenspritzen durch die ausgezeichneten Eigenschaften der resultierenden Schichten. Es lassen sich robuste und widerstandsfähige Beschichtungen mit guter Haftung und homogener Struktur erzeugen, die sich hervorragend für verschiedene industrielle Anwendungen eignen. Insbesondere bei Werkstoffen, die eine besondere Kombination aus Widerstandsfähigkeit, Korrosionsschutz und thermischen Eigenschaften erfordern, hat sich das Lichtbogenspritzen immer wieder als zuverlässige Lösung bewährt.

Neben den wirtschaftlichen Aspekten bietet das Lichtbogenspritzen auch technologische Vorteile gegenüber anderen thermischen Spritzverfahren. Gerade bei der Integration neuer Werkstoffe in den industriellen Einsatz rückt der Prozess aufgrund seiner Vielseitigkeit und seiner Fähigkeit, unterschiedliche Materialkombinationen zu verarbeiten, immer stärker in den Fokus. Die Erfahrungen aus dem aktuellen Projekt können daher direkt genutzt werden, um die Möglichkeiten des Lichtbogenspritzens auf neue Werkstoffe auszuweiten und die angestrebten Schichteigenschaften gezielt zu optimieren.

II.5 Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte die Publikation aktueller Teile des Gesamtvorhabens auf unterschiedlichen nationalen und internationalen Konferenzen immer gemeinsam mit allen Projektpartnern. Eine Liste aller Veröffentlichungen finden Sie im Teilprojekt des IOT

III. Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Die Integration von Diagnostik und Künstlicher Intelligenz (KI) wird zukünftig eine entscheidende Rolle in der Prozessoptimierung sowie der industriellen Fertigung spielen. Sie stellt nicht nur einen Weg dar, die Wirtschaftlichkeit von Produktionsabläufen zu steigern, sondern auch eine Strategie, um der zunehmenden Komplexität und den wachsenden Anforderungen moderner Industrie gerecht zu werden. Dieser technologische Ansatz hat das Potenzial, die Prozesse grundlegend zu transformieren und zahlreiche Herausforderungen zu adressieren, die Unternehmen heute und in Zukunft betreffen.

Ein zentraler Vorteil der Integration von Diagnostiksystemen und KI liegt in der Prozessüberwachung und Qualitätssicherung. Traditionell ist die Überwachung und Steuerung komplexer Produktionsabläufe oft personalintensiv und erfordert qualifizierte Fachkräfte. Angesichts des Fachkräftemangels, der in vielen Industriezweigen eine zunehmende Herausforderung darstellt, bietet die KI-gesteuerte Diagnostik eine Lösung, um diese Lücke zu schließen. Die KI kann Daten aus Diagnosesystemen in Echtzeit analysieren, interpretieren

und auf Grundlage dieser Informationen aktiv in den Prozess eingreifen, Fehler korrigieren oder notwendige Anpassungen vornehmen. Dadurch wird eine zuverlässige Überwachung von Prozessen gewährleistet, unabhängig von der Verfügbarkeit von Fachpersonal.

Darüber hinaus trägt die Kombination aus Diagnostik und KI erheblich zur wirtschaftlichen Optimierung von Produktionsprozessen bei. Durch die Echtzeitanalyse und die Fähigkeit, auf Abweichungen präzise zu reagieren, lässt sich Ausschuss minimieren, der Verbrauch von Ressourcen optimieren und die Effizienz steigern. Auf diese Weise wird nicht nur die Qualität der Endprodukte verbessert, sondern auch die Kosteneffizienz in der Fertigung erhöht. Die KI kann darüber hinaus auf Basis historischer und aktueller Daten Vorhersagen treffen sowie Empfehlungen geben, die langfristig zu stabileren und profitableren Prozessen führen.

Ein weiterer Aspekt, der die Bedeutung dieser Technologie unterstreicht, ist ihre Fähigkeit, die Industrie schneller an neue Standards und Anforderungen anzupassen. Die kontinuierliche Weiterentwicklung von industriellen Technologien und Standards macht es notwendig, Produktionsprozesse mit höchster Präzision und Geschwindigkeit anzupassen. Diagnostiksysteme kombiniert mit KI ermöglichen eine beschleunigte Entwicklung und Optimierung von Prozessen, da sie datenbasiert arbeiten und durch maschinelles Lernen selbstständig neue Optimierungspotenziale identifizieren können. Dies verkürzt die Einführungszeiten für neue Technologien erheblich und ermöglicht es Unternehmen, wettbewerbsfähig zu bleiben.

III.2 Technische Erfolgsaussichten

Projekte, die sich mit der Integration von Diagnostiksystemen und Künstlicher Intelligenz (KI) befassen, werden von der Industrie mit großem Interesse verfolgt. Unternehmen erkennen zunehmend das Potenzial dieser Technologien, um Prozesse zu optimieren, intelligente Steuerungen zu entwickeln und gleichzeitig die Effizienz sowie die Qualität ihrer Fertigungsabläufe zu steigern. Besonders die Analyse und die Ergebnisse solcher Projekte stoßen auf reges Interesse, da sie konkrete Einblicke in die praktische Anwendung moderner Technologien liefern und mögliche Lösungsansätze für aktuelle Herausforderungen aufzeigen. Immer häufiger gibt es gezielte Anfragen seitens der Industrie, um Zugang zu den gewonnenen Erkenntnissen und den daraus abgeleiteten innovativen Ansätzen zu erhalten.

Anlagenhersteller beobachten diesen Trend ebenfalls sehr aufmerksam und sind sich zunehmend bewusst, dass diese Technologien eine Schlüsselrolle für die Industrie der Zukunft spielen werden. Um wettbewerbsfähig zu bleiben und moderne Anforderungen zu erfüllen, zeigt sich bereits jetzt, dass Anlagenhersteller in Zukunft verstärkt auf Diagnostik- und KI-basierte Systeme setzen müssen. Die Integration solcher Technologien wird nicht nur die Leistungsfähigkeit ihrer Produkte und Anlagen erhöhen, sondern auch ein entscheidendes Verkaufsargument für Kunden sein, die eine intelligente Automatisierung und proaktive Prozesskontrolle wünschen.

III.3 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Eine präzise Aussage über die Geschwindigkeit der Partikel konnte in diesem Fall mit dem Verfahren PIV (Particle Image Velocity) nicht getroffen werden. Das Verfahren, das auf der

Bildanalyse von Partikelbewegungen basiert, erfordert spezifische Messbedingungen, die bei der vorliegenden Untersuchung nicht vollständig gegeben waren.

Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei den Werten, die bei einer typischen Beschichtungsdistanz relevant sind, da diese direkt mit der Qualität der erzeugten Beschichtung korrelieren. Allerdings zeigte sich bei dieser Methode, dass die Partikel in diesem Bereich eine deutlich niedrigere Temperatur aufwiesen. Dies führte dazu, dass sie im PIV-System nicht mehr ausreichend erfasst werden konnten. Da das Verfahren auf der sichtbaren Bewegung und Reflexion der Partikel basiert, konnten bei diesen Bedingungen keine ausreichenden Daten zur Messung gewonnen werden. Infolge dieser Einschränkung war es nicht möglich, eine qualitative Aussage über die Partikelgeschwindigkeit zu treffen.

III.4 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Es soll bei den einschlägig bekannten Konferenzen die auch bisher schon für Veröffentlichungen genutzt weiterhin über die Ergebnisse berichtet werden. Unter anderem soll mit der Öffentlichkeitsarbeit bei der GTS – Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V. technische Informationen erstellt werden, die frei zugänglich sind.

III.5 Kosten und Zeitplanung

Die Kosten und hielten sich exakt im Rahmen des eingereichten Projektes.