

Prozess- und Werkstoffentwicklung für Reibflächenbeschichtungen von Fahrzeugbremsen

Andreas Wank, GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach, D

1. Einleitung

Das Beschichten der Reibflächen von Fahrzeugbremsen, die meistens aus Grauguss bestehen, kann aus unterschiedlichen Motiven in Erwägung gezogen. Beispielsweise führte die verschleißbedingt geringe Lebensdauer spätestens in den 1990' er Jahren zu Laborversuchen, in denen die Reibflächen von Bremsscheiben mittels Hochgeschwindigkeitsflammspritzens (HVOF) mit WC/Co(Cr) beschichtet wurden. Weil solche Schichten und ihre notwendige mechanische Nachbearbeitung die Herstellungskosten im Vergleich zu einer unbeschichteten Bremsscheibe vervielfachen, bestand jedoch lange Zeit kein ausreichendes Interesse an einer Qualifizierung derart beschichteter Bremsscheiben. Da sich im Vergleich zu C/SiC Bremsen aber immer noch deutliche Kostenvorteile auftun, konnten sich mit Hartmetall beschichtete Bremsscheiben als Alternative im mittleren Preissegment für Sportwagen etablieren [1]. Ursprünglich wurden insbesondere die ästhetischen Vorzüge rostfreier Reibflächen der Bremsscheiben und das langfristige Erhalten metallisch blanker Aluminiumfelgen aufgrund einer um ca. 90% reduzierten Bremsstaubemission hervorgehoben. Mit der Einführung gesetzlicher Vorgaben zur Begrenzung des durch Bremssysteme freigesetzten Feinstaubes trat das Argument der Umweltfreundlichkeit in den Vordergrund. Das Beschließen gesetzlich verbindlicher Grenzwerte löste intensive Entwicklungsarbeiten, insbesondere im Bereich der Beschichtungstechnologien des Thermischen Spritzens - inklusive des Kaltgasspritzens - und des Laser-Pulver-Auftragschweißens (Laser Cladding) aus. Im Folgenden wird aus der Sicht eines Betriebs, der sich auf das Entwickeln von Beschichtungslösungen auf der Basis der zuvor genannten Technologien spezialisiert hat, dargestellt, welche Herausforderungen sich im Verlauf kontinuierlicher Entwicklungen für das Beschichten der Reibflächen von Grauguss-Bremsscheiben ergaben und welche Lösungsansätze erwägt und verfolgt wurden und werden.

2. Entwicklungsarbeiten zum Beschichten der Reibflächen von Grauguss-Bremsscheiben

2.1 Verfahrensauswahl

HVOF gespritzte Hartmetallschichten stellen eine bereits seit mehreren Jahren im Einsatz erprobte Technologie für den Schutz der Reibflächen von Grauguss-Bremsscheiben dar. In Kombination mit angepassten Reibbelägen ist für diese Schichten eine um ungefähr eine Größenordnung reduzierte Emission von Bremsstaub im Vergleich zu konventionellen unbeschichteten Grauguss-Bremsscheiben und darauf angepassten Reibbelägen nachgewiesen. Die etablierte Lösung beinhaltet allerdings als zusätzliche Prozesse ein Laserstrukturieren der Reibfläche und das Aufbringen einer Nickelschicht zum Absichern einer Korrosionsschutzwirkung - auch im Fall der Ausbildung eines Rissnetzwerks in der Hartmetallschicht im Gebrauch. Zudem besteht die Hartmetallschicht zum größten Teil aus Wolframcarbid und Nickel, für die als kritisch eingestufte Rohstoffe benötigt werden. Außerdem gilt es aus ökologischer Sicht das Freisetzen von nickelhaltigen Stäuben grundsätzlich zu vermeiden. Zu den grundlegenden Vorteilen des HVOF-Prozesses gehört die Möglichkeit Metall-Keramik-Verbundschichten (Cermet-Schichten) mit ca. 80 vol.-% Hartstoffgehalt mit Druckeigenspannungen bei Depositionsraten von ca. 10 kg/h herzustellen.

In Stichversuchen konnte nachgewiesen werden, dass mittels Laser Cladding aufgebrachte Schichten aus nichtrostenden Stählen eine geeignete Alternative zu den konventionellen Nickelschichten als Haftgrund mit Korrosionsschutzwirkung darstellen [2]. Die Untersuchungen zeigten auch auf, dass darauf Cermets und Hartlegierungen, die weder Nickel noch Kobalt, Wolfram und Kupfer enthalten, mittels HVOF aufgetragen werden können. Schichten aus Eisenbasishartlegierungen bildeten bei der Dyno-Prüfung (AMS-Test) keine Risse aus, verschlissen allerdings so schnell, dass sie im Folgenden nicht länger berücksichtigt wurden. $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{FeCr}$ und NbC/FeCr Schichten bildeten die auch von Hartmetallschichten bekannten Rissnetzwerke aus. Auch dieser Ansatz wurde nicht weiterverfolgt, weil mit HVOF und Laser Cladding zwei Beschichtungsprozesse erforderlich sind.

Andere Arbeitsgruppen entwickeln Kombinationen aus Laser Cladding Korrosionsschutzschichten und kaltgasgespritzten Cermet-Deckschichten weiter. Auch mittels Kaltgasspritzens lassen sich Schichten mit Druckeigenspannungen und geringer Porosität herstellen. Je nach Kombination von metallischer Matrix und karbidischer Verstärkung sowie Karbidgehalt, der deutlich geringer als in konventionellen HVOF Cermet-Schichten ist, was eine reduzierte Rissbildungsneigung bewirkt, lassen sich hohe Auftragwirkungsgrade erzielen. Für

Kombinationen aus Titanmatrices mit Wolframcarbidverstärkung sind aufgrund der Verwendung kritischer und relativ teurer Rohstoffe allerdings hauptsächlich Anwendungen in Kleinserien zu erwarten.

Die Möglichkeit metallurgisch angebundene und gasdichte Beschichtungen mit einem einzigen Prozess, der im Vergleich zu Spritzverfahren deutlich höhere Pulvernutzungsgrade ermöglicht, herstellen zu können zeichnet den Laser Cladding Prozess aus. Allerdings lassen sich, insbesondere wenn ein Vorwärmen der Bremsscheiben vermieden werden soll, nur deutlich geringere Hartstoffgehalte im Vergleich zu HVOF und Kaltgasspritzen bei der Herstellung rissfreier Schichten erzielen. Zudem stehen die Schichten unter Zugeigenspannungen. Dennoch fokussierten sich die Entwicklungsarbeiten zum Beschichten der Reibflächen von Grauguss-Bremsscheiben auf das Laser Cladding.

Da es sich bei Reibbremsen um ein tribologisches System handelt, müssen Beschichtungen für Reibflächen zwingend parallel zu angepassten Reibbelägen [1,3] - und unter Berücksichtigung von deren Interaktion bspw. in Abhängigkeit vom verwendeten Bremssattel - entwickelt werden, um eine relevante Bewertung vornehmen zu können. Neben dem obligatorischen Absichern definierter Reibwerte bei unterschiedlichen Randbedingungen als Basisfunktion, sind die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zur Begrenzung von Bremsstaubemission und eine ausreichende Lebensdauer unter Berücksichtigung gegebenenfalls auftretender korrosiver Belastung nachzuweisen, so dass eine umfassende Qualifizierung eines neuen Bremssystems sehr aufwendig ist.

2.2 Prozessführung

Das hochwertige Beschichten von Grauguss mittels Auftragschweißens erfordert die Wechselwirkung zwischen dem Grundwerkstoff und dem Schmelzbad des Beschichtungswerkstoffs auf ein notwendiges Minimum zu beschränken, um Rissbildung zu vermeiden. Schlüssel zum Erfolg sind das Anwenden hoher Überlappungsgrade ($> 90\%$) der Schweißraupen, so dass der größte Teil des Schweißbads mit zuvor aufgetragenem Beschichtungsmaterial interagiert und hohe Schweißgeschwindigkeiten (bis zu 400 m/min), um einerseits die Erwärmung an der Oberfläche zu konzentrieren und andererseits trotz hoher Überlappungsgrade und der Anwendung hoher Laserleistungen und Pulverfördererraten zum Minimieren der Beschichtungszeiten geringe Schichtdicken aufzutragen. Dabei ist die Verwendung von quasi-koaxialer Pulverzufuhr aus 6-Strahl-Pulverdüsen, die auch für Cladding-Prozesse bei Laserleistungen von wenigen kW und Schweißgeschwindigkeiten um 1 m/min Einsatz finden,

mit Foki von Laser- und Pulverstrahl auf der Bauteiloberfläche zielführend. In eigenen Versuchsreihen erwiesen sich Abweichungen von einer Top-Hat-Leistungsdichteverteilung im Rund-Spot als nicht zielführend. Auch ein Aufteilen der Laserleistung in einen Hauptstrahl, mit dem das Pulver interagiert, und einen vor- oder nachlaufenden Strahl führte jeweils zu Produktivitätseinbußen.

Für das reproduzierbar hochwertige Beschichten der Reibflächen von Bremscheiben bei Depositionsraten von $> 10 \text{ kg/h}$ und Flächenraten von $> 5 \text{ m}^2/\text{h}$ ist die Kontrolle der zugeführten Pulverströme sowohl in Bezug auf die Stabilität der Pulverförderrate als auch in Bezug auf die Partikeldichteverteilung und die Geschwindigkeit der zugeführten Partikel von zentraler Bedeutung. Anpassungen der Partikeldichteverteilung ermöglichen den lokalen Einbrand gezielt zu steuern und über die Geschwindigkeit der Partikel lässt sich deren Erwärmung infolge von Wechselwirkung mit dem Laserstrahl auf dem Weg ins Schmelzbad einstellen [4,5]. Unter Verwendung von Pulververteilern ließ sich in eigenen Versuchsreihen keine ausreichende Kontrolle über die Partikeldichteverteilung erzielen, insbesondere wenn für das vollflächige Beschichten der Reibflächen von Bremscheiben ein Anstellen der Pulverdüse erforderlich war.

Besonders kostengünstig sind einlagige Beschichtungen herzustellen. Allerdings weisen Schichten aus nichtrostenden Stählen, auch im Fall martensitischer Varianten, in Kombination mit einer Vielzahl von Reibbelägen selbst im Vergleich zum Grauguss-Substrat eine reduzierte Verschleißbeständigkeit auf [6-8]. Das Verstärken mit karbidischen Partikeln bewirkt dagegen schon für Anteile von 10 Vol.-% signifikante Verbesserungen [9]. Andererseits resultiert aus der Hartstoffverstärkung eine Abnahme des Widerstands gegen das Bilden und Ausbreiten von Rissen. Daher werden aktuell Kombinationen von Zwischenlagen aus nichtrostenden Stählen und Decklagen aus karbidverstärkten nichtrostenden Stählen qualifiziert. Trotz Zugeigenspannungen weisen die unverstärkten Zwischenlagen eine so hohe Duktilität auf, dass in Grauguss-Substraten bereits Rissbildung erfolgt, bevor sich von der Oberfläche ausgehende Risse durch die Zwischenschicht ausbreiten konnten.

Eine Nachbearbeitung der Beschichtungen durch Schleifen oder Honen ist zum Einstellen geeigneter Rauheiten und gegebenenfalls für das Erfüllen der Planlaufvorgaben erforderlich. Die Kosten der Nachbearbeitung steigen mit dem durch den Beschichtungsprozess hervorgerufenen Verzug. Je nach Geometrie der Bremscheiben kann der Laser Cladding Prozess einen starken Verzug hervorrufen, der nicht mit der zum Beschichten verwendeten Laserleistung, sondern mit dem Wärmeeintrag (Produkt aus Laserleistung und Beschichtungs-

zeit) korreliert. Einteilige Bremsscheiben mit einem großen Abstand zwischen Reibfläche und Topf neigen zu besonders starkem Verzug, während an zweiteiligen Bremsscheiben ohne steife Verbindung zwischen Reibfläche und Topf nur geringer Verzug entsteht. Unter Anwendung geeigneter Schweißstrategien (Abfolge des Auftragens einzelner Lagen auf Vorder- und Rückseite der Scheiben) lassen sich auch die Reibflächen von Grauguss-Bremsscheiben mit ungünstigem Aufbau verzugsarm beschichten. Allerdings wird auch beobachtet, dass Rohscheiben aus verschiedenen Chargen unterschiedliche Eigenspannungszustände aufweisen können, die bei Anwendung identischer Beschichtungsprozesse unterschiedlichen Verzug hervorrufen [4]. Ein Spannungsarmglühen könnte ein gegebenenfalls erforderliches Anpassen der Schweißstrategie auf den chargenbezogenen Eigenspannungszustand obsolet machen, würde aber auch zu höheren Kosten in der Fertigung führen.

Die Temperaturhistorie während des Laser Cladding Prozesses beeinflusst nicht nur den Verzug, sondern auch die Rissneigung der Beschichtungen. Werden identische Prozessparameter mit und ohne Kühlpausen zwischen dem Beschichten beider Seiten einer Bremsscheibe angewendet, so lassen sich zwar jeweils rissfreie Reibflächen im geschliffenen Zustand erreichen. Allerdings kann sich im Gebrauch eine von der Temperaturhistorie abhängige Neigung zur Rissbildung zeigen [4].

Auch für herkömmliche Grauguss-Bremsscheiben übliche Toleranzen des Außendurchmessers können für das Beschichten mittels Laser Cladding eine Herausforderung darstellen. Um Verletzungsgefahr bei manuellem Handling der Scheiben auszuschließen, werden die Kanten mit Fasen ausgeführt. Diese können wegen der zulässigen Toleranzen aber an einer einzigen Scheibe lokal vernachlässigbar klein oder mehrere Millimeter breit vorliegen. Unter diesen Randbedingungen ist es teilweise nicht möglich den Beschichtungsprozess so zu führen, dass eine vollständige Anbindung der Beschichtung abgesichert und gleichzeitig lokale Mikrorissbildung auf dem gesamten Umfang ausgeschlossen wird. In einer vollautomatisierten Produktion kann auf das Anbringen von Fasen verzichtet werden. Wenn das Anbringen von Fasen nicht vermieden werden kann, erscheint das Gießen von Scheiben mit geringem Übermaß und gezieltes mechanisches Nachbearbeiten zum Erreichen einer homogen ausgeprägten Fase geeignet.

Die bestmögliche Produktivität wird erzielt, wenn ein Beschichtungskopf kontinuierlich nur einen Schichttyp, d.h. nur die unverstärkte Zwischenlage oder nur die hartstoffverstärkte Decklage, aufträgt, wobei Bremsscheiben kontinuierlich in den Arbeitsbereich unter dem Beschichtungskopf zugeführt werden. So entfällt die Notwendigkeit für eine Anpassung der

Pulverzufuhr auf einen anderen Pulvertyp und gegebenenfalls eine andere Förderrate entsprechend der für die Herstellung der jeweiligen Lage optimalen Prozessparameter. Allerdings würde der Ausfall einer Anlage den vollständigen Stillstand einer verketteten Fertigungslinie bewirken, so dass das vollständige Beschichten einer Bremsscheibe in einem Zug unter Berücksichtigung einer Pulverumschaltung bevorzugt wird. Pneumatisch betätigte Quetschventile haben sich als robuste und langlebige Lösung für das Umschalten zwischen Pulverlinien für unterschiedliche Zusatzwerkstoffe etabliert. Zum Erzielen minimaler Totzeiten für die Umschaltprozesse erweist sich ein kontinuierliches Fördern beider Pulver, zwischen denen umgeschaltet wird, und das Austragen der Pulverströme entweder in die Pulverdüse oder in einen Auffangbehälter für die spätere Rückführung in den Pulverförderer als zielführend. Darüber bleiben die Druckverhältnisse in der Förderstrecke besonders stabil und Verstopfungen werden effektiv vermieden. Eine kompakte Bauform mit möglichst kleinen Toträumen erlaubt die Totzeiten für das Umschalten bis zum Erreichen eines stabilen, definierten Pulverstroms zu minimieren. Die Totzeiten sinken mit zunehmender Pulverförderrate und abnehmender Schüttdichte des Zusatzwerkstoffs. Für typische Prozesse in der Massenfertigung von Bremsscheiben sind bei der Nutzung von nichtrostenden Stahlmatrices und Verstärkungen aus TiC/FeCr Verbundpulvern Umschaltzeiten von 4 s möglich.

Um das Personal möglichst selten Stäuben der Beschichtungswerkstoffe auszusetzen, kommen Pulverförderer, die eine automatische Befüllung über einen mit einem Quetschventil verschlossenen Pulverzufuhrstrang zulassen, zum Einsatz. Diese Technologie hat sich bereits in der Massenfertigung beschichteter Lambdasensoren über viele Jahre als zuverlässig erwiesen. Die Zufuhr von Pulver zu dem Zufuhrstrang der Pulvertöpfe erfolgt mechanisch entkoppelt mittels Vakuumförderung, wie sie auch bereits für das automatische Befüllen von Maschinen für die additive Fertigung mittels Laser Powder Bed Fusion oder Selektiven Lasersinterns genutzt werden. Bei Verwendung von wiederverwendbaren Gebinden, aus denen die Pulver mittels Vakuumförderung zu den Pulverförderern transportiert werden, wird ein großes Aufkommen von Sondermüll in Form von mit Pulverresten kontaminierten Plastik-Pulverflaschen vermieden.

2.3 Zusatzwerkstoffentwicklung

Aufgrund der Anforderung das Freisetzen von nickel-, kobalt- und kupferhaltigen Stäuben auszuschließen, eignen sich insbesondere nichtrostende Stähle als Matrixwerkstoffe, um mittels Laser Cladding Reibflächen von Bremsscheiben vor Korrosion und Verschleiß zu schützen.

Aluminiumlegierungen weisen eine zu geringe Temperaturbeständigkeit auf und sind mit Grauguss infolge der starken Neigung zur Bildung spröder intermetallischer Phasen ebenso wenig metallurgisch kompatibel wie Titanlegierungen. Zudem weisen Pulver aus nicht-rostenden Stählen im Vergleich zu Titanlegierungen einen erheblichen Kostenvorteil auf.

Bei der Werkstoffauswahl bzw. -entwicklung gilt es zu beachten, dass aufgrund der besonders hohen Abkühlraten eine vom Schaeffler-Diagramm abweichende, metastabile Mikrostruktur-ausbildung erfolgen kann [2,4]. Das Erwärmen der Bremsscheiben bei Bremsvorgängen kann in diesen Fällen nicht nur zu Kornvergrößerung, sondern auch zu Phasenumwandlungen führen. Aus der Schweißtechnik ist für austenitische Stähle eine Tendenz zur Heißrissbildung bekannt, während martensitische Stähle zu Kaltrissbildung neigen. Daraus lässt sich ein hohes Potenzial für umwandlungsfreie, ferritische nichtrostende Stähle ableiten.

Zum Absichern einer guten Beständigkeit gegen Lochfraßkorrosion kann das Kriterium für Meerwasserbeständigkeit (Pitting Resistance Equivalent Number $PREN > 32$) herangezogen werden. Gleichzeitig gilt es den Anteil von Legierungselementen geeignet zu begrenzen, um keine Bildung spröder Sigma-Phasen, die sich zudem negativ auf die Korrosionsbeständigkeit auswirken, hervorzurufen. Schließlich sollte der potenziellen Gefahr interkristalliner Korrosion infolge von Aufmischung mit dem Grauguss-Substrat und darauf beruhendem Eintrag von Kohlenstoff in das Schweißbad begegnet werden, indem starke Karbidbildner zugesetzt werden, die eine Verarmung von Chrom und Molybdän im Eisenmischkristall durch Abbinden von eingetragenen Kohlenstoff verhindern. Auf der Basis der zuvor genannten Erwägungen erfolgte die Entwicklung des nichtrostenden, ferritischen Stahls FeCr21Mo4,5Nb2 (GTV 80.99.1, GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach, D). Für diesen Werkstoff konnte nicht nur eine hervorragende Eignung als Matrixwerkstoff für Bremsscheibenbeschichtungen, sondern auch für den kombinierten Verschleißschutz und Korrosionsschutz von Hydraulikzylindern sowie von Walzen in der Druckindustrie nachgewiesen werden.

Oxidische Hartstoffe werden von Stahlschmelzen schlecht benetzt und verdampfen bei Einwirken von Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von ca. 1 μm sehr rasch, so dass diese als ungeeignete Hartstoffe für Bremsscheibenbeschichtungen zu betrachten sind. Boride sind teuer und zudem metallurgisch unvorteilhaft, weil das Auflegieren mit Bor eine starke Versprödung von Eisenbasislegierungen bewirkt. Unter den karbidischen Hartstoffen zeichnet sich SiC durch einen besonders günstigen Preis aus. Allerdings neigt es zu einem sehr raschen Auflösen in Schmelzen von Eisenbasislegierungen mit Bildung spröder Silizide, so dass Rissbildung bereits für geringe Zugaben von nur 10 Vol.-% nicht vermeidbar ist [3].

Bei geeigneter Prozessführung, die den Wärmeeintrag in die Hartstoffe auf dem Weg ins Schmelzbad begrenzt, können rissfreie Schichten mit Verstärkung durch Wolframschmelzcarbid (W_2C/WC), das als etablierter Hartstoff kommerziell gut verfügbar ist, hergestellt werden [4,5]. Dennoch weist das Wolframschmelzcarbid eine im Vergleich zu TiC und NbC unterlegene metallurgische Kompatibilität zu Eisenbasislegierungsmatrizes auf, denn es bildet nach dem Lösen in Stahlschmelzen spröde Mischcarbide aus, während sich TiC und NbC wieder als Monocarbide ausscheiden. Darauf beruht auch die geringe Rissanfälligkeit, die für das Verwenden von TiC und NbC als Hartstoffe für das Beschichten der Reibflächen von Bremscheiben beobachtet wird.

TiC und NbC können in Reinform als gesinterte und gebrochene Pulver eingesetzt werden. Um die kantigen Pulver langfristig mit ausreichender Stabilität der Förderrate fördern zu können, erweist sich eine nominelle Körnung von mindestens +10 -53 μm als erforderlich. Derart grobe Hartstoffe neigen allerdings bei der spanenden Nachbearbeitung zur Bildung von Rissen und letztlich von Mikrokratern an darauf basierenden Ausbrüchen. Zudem bewirkt die große spezifische Oberfläche ein starkes Anlösen der Karbidpartikel. Die Anreicherung der Matrix aus rostfreiem Stahl mit einer hohen Dichte wieder ausgeschiedener Karbidpartikel reduziert die Duktilität. Schließlich erweisen sich grobe Hartstoffpartikel nicht als erforderlich, um eine hohe Verschleißbeständigkeit bei Einsatz geeigneter Reibbeläge zu erzielen.

Um feine Hartstoffpartikel mit einer mittleren Größe von ca. 1 μm unter Verwendung konventioneller Scheibenförderer einsetzen zu können, werden Verbundpartikel in einer ausreichend groben Körnung benötigt. Eine Möglichkeit besteht in der Herstellung von Verbunden ausschließlich aus Hartstoffpartikeln, die über einen flüchtigen Binder zusammengehalten werden. Das Fließverhalten derartiger Verbundpulver hängt allerdings stark von den Umgebungsbedingungen ab. Die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit beeinträchtigt die Förderstabilität.

Alternativ können Verbunde aus feinen Hartstoffpartikeln und metallischen Bindern hergestellt werden. Um die Anforderungen in Bezug auf die Vermeidung umweltgefährdender Stoffe aufrecht zu erhalten, sind Binder auf der Basis nichtrostender Stähle zielführend. In Anlehnung an etablierte Verbunde aus Karbiden und metallischen Bindern erfolgte die Entwicklung von NbC- und TiC-basierten Pulvern mit einem Matrixanteil von ca. 20 Vol.-%, d.h. NbC-20 Gew.-% FeCr und TiC-30 Gew.-% FeCr [2,5]. Werden über Sprühtrocknen und Sintern hergestellte, poröse Verbunde nicht ausreichend von der Schmelze der Matrix aus nichtrostendem Stahl bei der Schichtherstellung infiltriert, liegen Schwachstellen vor, die bei

der Nachbearbeitung mittels Schleifens oder bei Bremsvorgängen Mikrokrater entstehen lassen. Diese Problematik wird bei Verwendung gesinterter und gebrochener Verbundpulver vermieden. Allerdings erfordert deren unregelmäßige Form den Einsatz gröberer Fraktionen im Vergleich zu sprühgetrockneten und gesinterten Verbunden. Zudem ist der Herstellungsprozess weniger effektiv, so dass aktuelle Entwicklungen auf die Herstellung dichter Verbunde über angepasste Prozesse beim Sprühtrocknen und Sintern fokussieren.

Zwar weist NbC infolge des Vermeidens der Ausbildung von Karbidbändern, die teilweise beim Einsatz von TiC beobachtet wird [4,5], die beste Eignung zur Vermeidung von Rissbildung auf. Der im Vergleich zu TiC, insbesondere volumenbezogen, deutlich höhere Preis und die strategische Abhängigkeit von einem Rohstofflieferanten bewirken aktuell eine Fokussierung auf TiC-basierte Hartstoffe bei der Entwicklung von Schutzschichten für Brems scheiben.

Sphäroidisiertes TiC weist eine exzellente Förderstabilität auf und erlaubt die Herstellung von Verbundschichten mit geringer Rissanfälligkeit. Die geringe Verfügbarkeit und der hohe Preis machen es aber für die Massenanwendung zum Beschichten der Reibflächen von Brems scheiben ungeeignet.

2.4 Prozessdiagnostikwerkzeuge

Um die Erfordernisse einer Massenfertigung von Brems scheiben mit mittels Laser Cladding beschichteten Reibflächen unter Einsatz von Strahlleistungen $> 20 \text{ kW}$ erfüllen zu können, erfolgten Weiterentwicklungen zur Optimierung der meisten Anlagenkomponenten sowie zusätzliche Entwicklungen, die insbesondere auf das Charakterisieren des Prozesszustands abzielen [10,11]. So gehört es zum Stand der Technik, dass in regelmäßigen Intervallen die Leistung des aus dem Bearbeitungskopf austretenden Laserstrahls mit Hilfe von Kalorimetern überprüft wird. Auch die 3D-Kontur der aus der Düse austretenden Pulverstrahlen wird offline mithilfe digitaler Bildanalyse ermittelt. Dafür erfolgt eine Relativbewegung zwischen der Düse bei aktivierter Pulverförderung und einem Linienlaser, der sukzessiv parallele Ebenen des Pulverstroms beleuchtet. Für quasikoaxiale Pulverzufuhr lassen sich Daten der Geometrie der aus den einzelnen Injektoren austretenden Pulverströme berechnen. Zudem steht mit der Intensität im Querschnitt der einzelnen Pulverstrahlen ein mit der Pulverförderrate korrelierender Wert zur Verfügung. Für die Bewertung des Pulverstroms wird aber vorwiegend der Durchmesser der vereinigten Pulverstrahlen im Arbeitsabstand zugrunde gelegt. Durch Korrelation von Beschichtungsqualität und Pulverstrahldurchmesser lässt sich ein Kriterium für den Wechsel von Injektorinserts oder gegebenenfalls weiterer Instandsetzungsmaßnahmen

ableiten. Eine online Charakterisierung des Prozesszustands ist auf der Basis der Auswertung von im optischen Pfad angeordneten Kameras, die auch zur Ausrichtung von Pulver- und Laserstrahl verwendet werden, möglich. Die in einem um das Schmelzbad angeordneten Auswertungsbereich ermittelte Emissionsintensität verändert sich über die Reibfläche für einen geeigneten Beschichtungsprozess. Durch Definition von Hüllkurven lassen sich unzulässige Prozesszustände erfassen. Darüber hinaus können Instabilitäten der Pulverströme während des Beschichtens durch Beleuchten der aus der Düse austretenden Pulverstrahlen mittels Linienlaser in einer Ebene knapp unter dem Düsenaustritt erfasst werden. Schließlich lässt sich mittels Lasertriangulation online die aufgetragene Lagendicke durch Differenzbildung der Abstände zwischen Sensor und Bauteiloberfläche vor und hinter dem Schmelzbad kontinuierlich ermitteln.

3. Zusammenfassung

Mittels Laser Cladding hergestellte Verbundschichten aus nichtrostenden Stählen und karbidischer Verstärkung eignen sich für den kombinierten Korrosions- und Verschleißschutz der Reibflächen von Grauguss-Bremsscheiben. Entwicklungen der Prozessführung und Anlagentechnik erlauben die Schichtherstellung mit kurzen Zykluszeiten bei hoher Reproduzierbarkeit. Unterschiedliche Prozessdiagnostikwerkzeuge ermöglichen das Erfassen unzulässiger Prozesszustände und somit das Verhindern der Produktion größerer Mengen von Ausschussteilen. Als besonders vielversprechend sind Kombinationen aus seewasserbeständigen ferritischen Stählen als Zwischenlagen- und Matrixwerkstoff und TiC/FeCr als Verstärkungskomponente zu bewerten.

Literatur

- [1] Elbrigmann, T.: Hart wie Diamant, Porsche-Kundenmagazin Christophorus, Nr. 384, <https://www.porsche.com/germany/aboutporsche/christophorusmagazine/archive/384/articleoverview/article03/>
- [2] Wank, A., C. Schmengler, A. Krause, K. Müller-Roden, T. Wessler: Environmentally friendly protective coatings for brake disks. Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 32, 2023, 443-455
- [3] Rettig, M., J. Grochowicz, K. Kaesgen, R. Eaton, A. Wank, A. Hitzek, C. Schmengler, S. Koss, M. Voshage, J.H. Schleifenbaum, C. Verpoort, T. Weber: Carbide Brake Rotor Surface

Coating Applied by High-Performance Laser-Cladding. Proceedings of EuroBrake 2020, Barcelona, ES, June 2nd - 4th, 2020, EB2020-MDS-025, 1-8

[4] Wank, A.: Tailoring of workpiece geometry and coating microstructure in laser cladding processes. Emporia, May 16th - 17th, 2023, Aachen, D, https://www.gtv-mbh.de/_Resources/Persistent/9/7/8/3/9783df4f6f8e847f97d5f1af34618ec02c2b5758/Emporia%202023%20GTV.pdf

[5] Wank, A., C. Schmengler, D. Pehl, A. Krause, S. Barteck: Influence of carbide feedstock on properties of protective laser claddings for grey cast iron brake rotors. Eurobrake 2023, September 12th - 14th, 2023, Barcelona, ES, EB2023-CMT-001

[6] Lyu, Y., M. Leonardi, A. Mancini, J. Wahlström, U. Olofsson: Tribology and Air-borne Particle Emission of Laser-Cladded Fe-Based Coatings versus Non-Asbestos Organic and Low-Metallic Brake Materials. Metals, Vol. 11, 2021, No. 11, 1703

[7] Rajaei, H., C. Menapace, S. Amirabdollahian, M. Perini, G. Straffelini, S. Gialanella: Microstructural and Tribological Evaluation of Brake Disc Refurbishing Using Fe-Based Coating via Directed Energy Deposition, Metals, Vol. 12, 2022, No. 3, 465

[8] Olofsson, U., Y. Lyu, A. H. Aström, J. Wahlström, S. Dizdar, A.P. Gomes Nogueira, S. Gialanella: Laser Cladding Treatment for Refurbishing Disc Brake Rotors: Environmental and Tribological Analysis, Tribology Letters, Vol. 69, 2021, 57

[9] Tonolini, P., L. Montesano, A. Pola, E. Landriani, M. Gelfi: The effect of laser-cladding on the wear behavior of gray cast iron brake disc, Procedia Structural Integrity, Vol. 33, 2021, 1152-1161

[10] Wank, A., C. Schmengler, A. Hitzek, A. Krause, M. Mülln: Progress in Laser Additive Manufacturing Equipment and Applications. Journal of Japan Laser Processing Society, Vol. 29, 2022, No. 1, pp. 1-6

[11] Wank, A., T. Königstein, C. Schmengler, D. Pehl, A. Krause, S. Barteck, M. Mülln, K. Müller-Roden, T. Wessler: Beschichtungsstrategien und Prozesssicherung beim Beschichten von Bremscheiben. Tagungsband 8. GTV Kolloquium Thermisches Spritzen & Laser Cladding, 02. September 2022, Luckenbach, D, S. 99-111



Prozess- und Werkstoffentwicklung für Reibflächenbeschichtungen von Fahrzeugbremsen

Andreas Wank

18. Aachener Oberflächentechnik Kolloquium, Aachen, D, 06.12.2024



- Aufgabenstellung
- Ansätze für Beschichtungslösungen
- Prozessführungsentwicklung
- Zusatzwerkstoffentwicklung
 - Metallische Matrix
 - Hartstoff
- Hardware-Entwicklung
- Prozessdiagnostikwerkzeuge



Aufgabenstellung

- Definiert hohe Reibwerte ohne Fading unter allen Randbedingungen
(bei Einsatz beliebiger Reibbeläge)
- Einhaltung gesetzlicher Partikelemissionsgrenzen
(bereits vor Beschlüssen zu Testbedingungen und Grenzwerten)
- Korrosionsschutzwirkung
- Rissfreiheit
- „Lange“ Lebensdauer
- **Minimale Kosten**

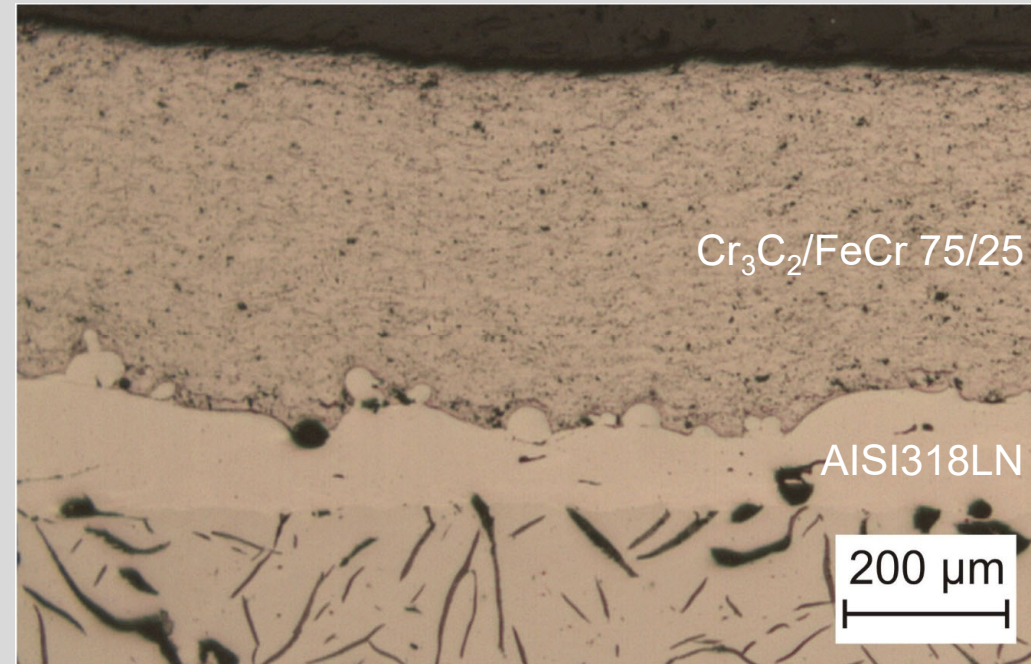
Ansätze für Beschichtungslösungen

- Buderus iDisc / PSCB; galvanischer Nickelüberzug über strukturierter Grauguss-Oberfläche für Korrosionsschutz und HVOF Hartmetalldecklage
- Im Straßenverkehr bewährte Lösung
- Nachweislich deutliche Reduktion von PM_{10} -Emission
- Neben spanender Bearbeitung drei weitere Prozesse
- Nutzung kritischer Rohstoffe W und Ni



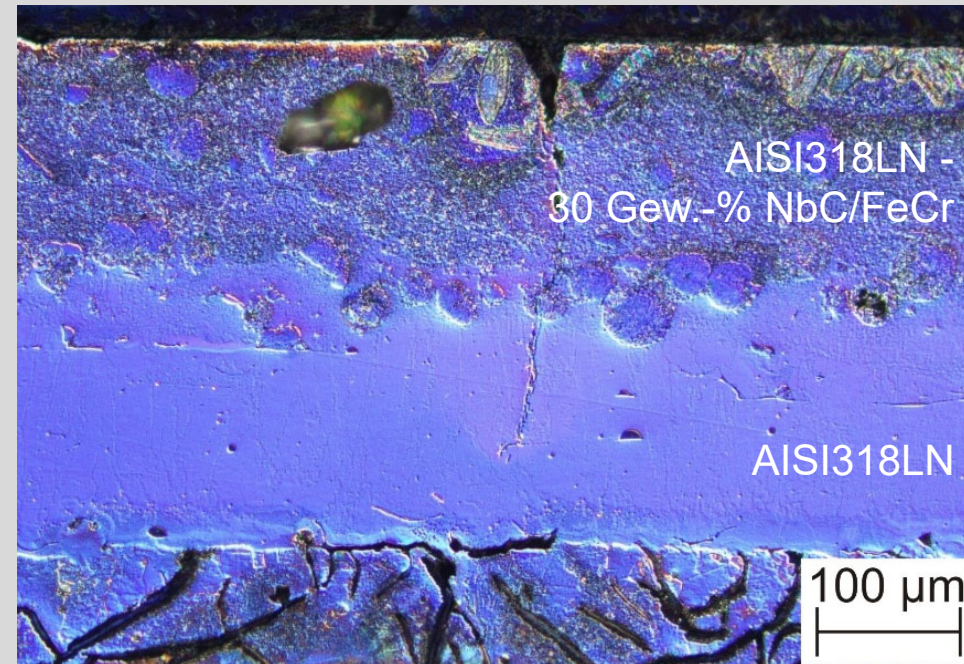
Ansätze für Beschichtungslösungen

- Laser Cladding Korrosionsschutzlage aus RSH-Stahl und HVOF / CGS Decklage aus Cermet (oder Hartlegierung)
- Korrosionsschutz über gasdichte Laser Cladding Schicht
- HVOF / CGS Schichten weisen Druck-eigenspannungen auf und erlauben hohe Hartstoffgehalte ohne Rissbildung sowie geringe Rauheit
- Neben spanender Bearbeitung zwei weitere Prozessschritte



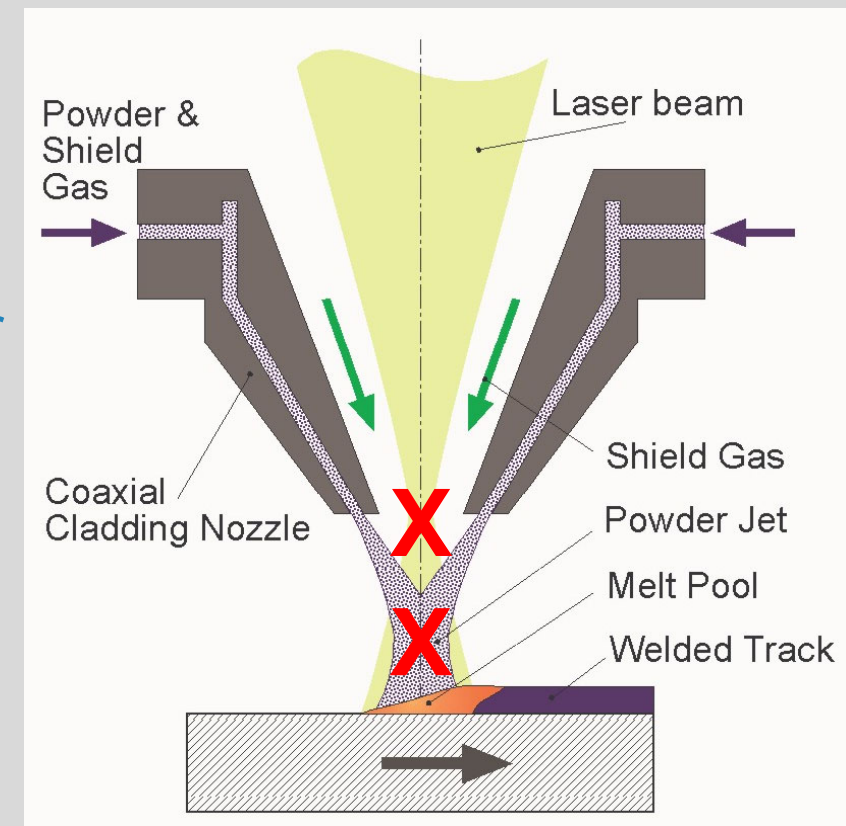
Ansätze für Beschichtungslösungen

- Laser Cladding von hartstoffverstärkten RSH-Stählen (Monolayer)
- Laser Cladding von hartstoffverstärkten RSH-Stählen auf RSH-Stahl-Zwischenlage
- Neben spanender Bearbeitung ein weiterer Prozess
- Gasdichte Schichten mit metallurgischer Anbindung
- Zugeigenspannungen, aber Grauguss-substrate versagen lange vor Rissfortschritt durch unverstärkte RSH-Stahl-Lage



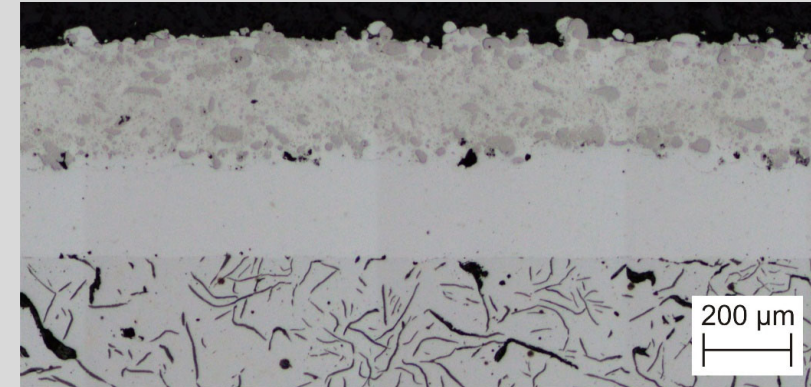
GTV Prozessführungsentwicklung

- Kein EHLA; Laserstrahl- und Pulverfokus auf der Bauteiloberfläche
- Konventionelle 6-Strahl-Pulverdüse
- Minimaler Einbrand durch Anwendung starker Überlappung der Schweißraupen ($> 90\%$)
- Prozesszeitminimierung durch Anwendung hoher Strahlleistung ($> 20 \text{ kW}$)
- Top-Hat Profil Rundstrahl; keine Strahlformung erforderlich
- Keine Pulververteiler!

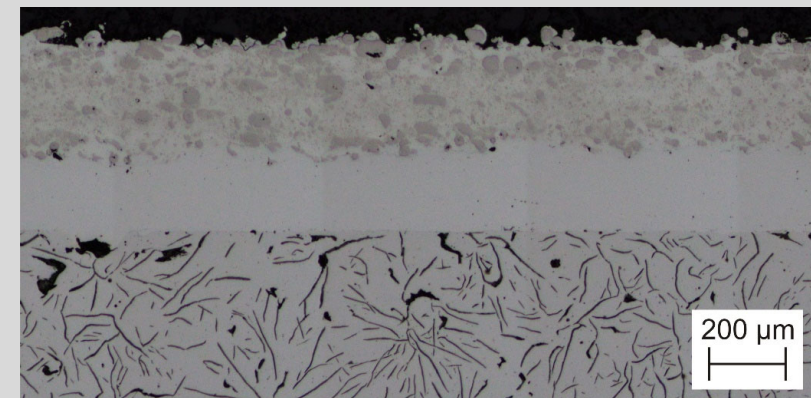


Einfluss der Pulverdichteverteilung

- Kontrolle der lokalen Dichte von Pulverpartikeln auf dem Weg aus der Pulverdüse ins Schmelzbad ermöglicht die Einwirkung des Laserstrahls auf die Substratoberfläche bzw. zuvor aufgetragene Lagen gezielt einzustellen



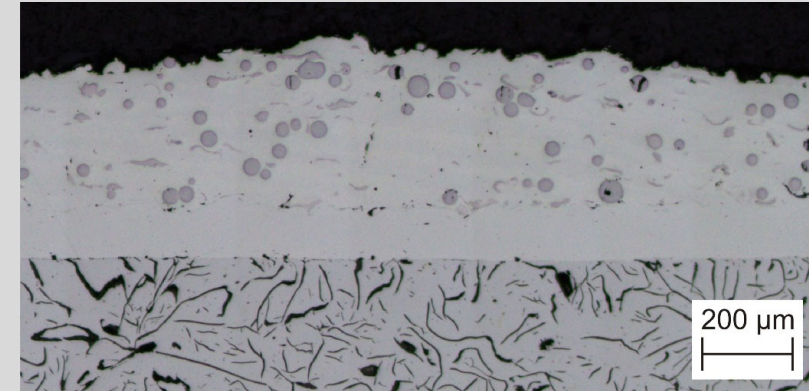
28/29/27/27 g/min AISI 430L
17/17 g/min TiC/FeCr 70/30



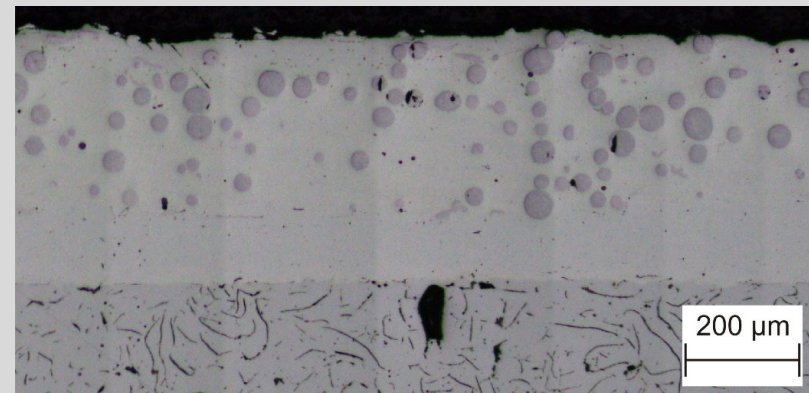
32/32/24/23 g/min AISI 430L
21/13 g/min TiC/FeCr 70/30

Einfluss der Partikelgeschwindigkeit

- Kontrolle der Geschwindigkeit von Pulverpartikeln über die Trägergasflussrate ermöglicht den Wärmeübertrag des Laserstrahls auf die Partikel gezielt einzustellen
- Begrenzung des Wärmeübertrags auf Karbidpartikel ermöglicht deren Aufschmelzen und Sprödphasenbildung durch Reaktionen mit der Schmelze metallischer Matrices zu verhindern



Trägergas Ar, WSC_s 2x 4 l/min



Trägergas Ar, WSC_s 2x 6 l/min



Herausforderungen

- Bremsscheibendesign kann das Anstellen der Pulverdüse erfordern, um Kollisionen von Pulverdüse und Bremsscheibentopf zu verhindern
- Undefinierte Fasen bei konventionellen Schwankungen des Außendurchmessers
- Verzug hängt von Bremsscheibendesign (und Schweißstrategie) ab; einseitiges Beschichten mit 500 μm Schichtdicke kann 800 μm Verzug bewirken
- Schwankungen des Eigenspannungszustands vor dem Beschichten bewirken unterschiedlichen Verzug bei identischem Cladding Prozess; Spannungsarmglühen für FNC akzeptiert, für Laser Cladding bisher abgelehnt
- Bauteiltemperaturhistorie nimmt Einfluss auf Rissbildungsneigung

- Reibringflächen nach AK Master Dyno-Prüfung, 430L + 430L / TiC
Cladding Fahrzeuginnenseite, Abkühlen auf RT, Cladding Fahrzeugaußenseite



- Reibringflächen nach AK Master Dyno-Prüfung, 430L + 430L / TiC
Cladding Fahrzeuginnenseite, Cladding Fahrzeugaußenseite ohne Abkühlvorgang

FI

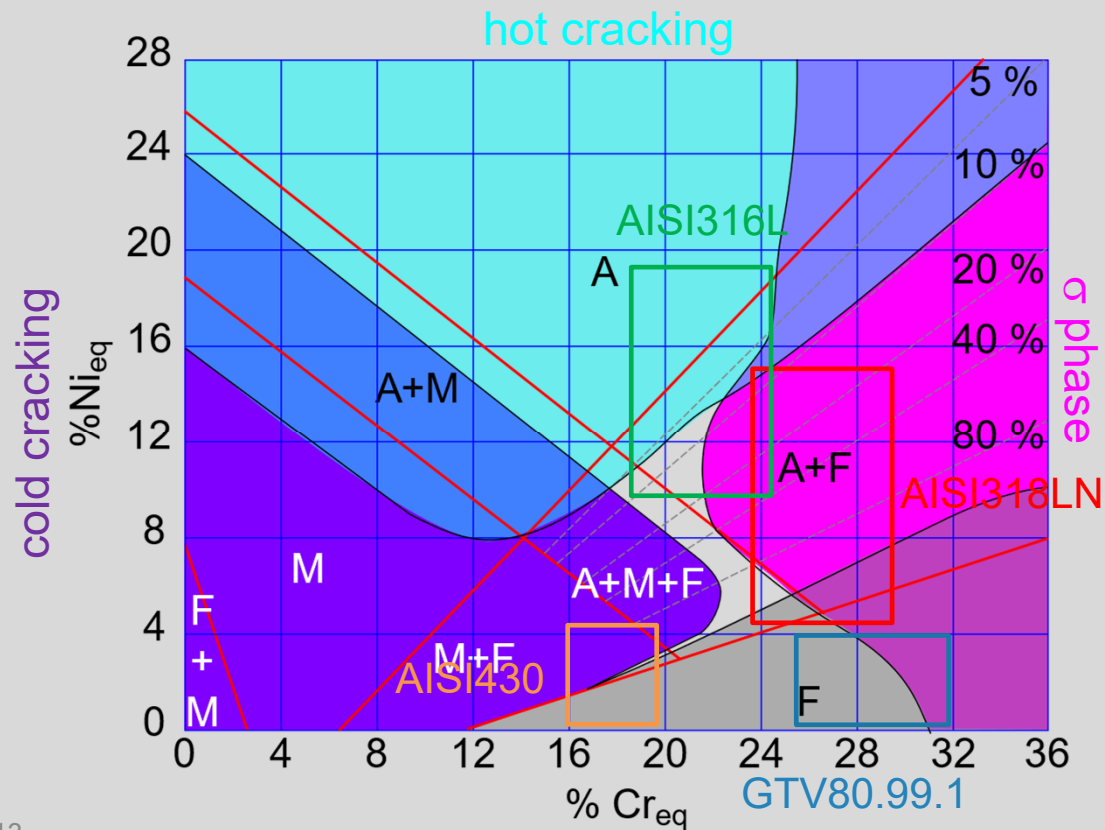


FA



Zusatzwerkstoffentwicklung - Matrix

- Vermeidung von Sigma-Phasen-Bildung
- Vermeidung von Heiß- und Kaltrissen
- Vermeidung der Legierungselemente
Co, Ni, Cu (und W)





Zusatzwerkstoffentwicklung - Matrix

- Korrosionsbeständigkeit auch gegen Lochfraß in Gegenwart von Chloriden
PREN > 32 seewasserbeständig
 - AISI430L: 16,0 - 19,6
 - AISI316L: 23,1 - 30,2
 - AISI318LN: 30,9 - 38,1
 - GTV80.99.1: 33,2 - 40,1
 - 1.3820, X8CrMnN20-10: 24,4 - 33,7
- GTV80.99.1 FeCr21Mo4,5Nb2 bewahrt seine Korrosionsbeständigkeit auch bei Aufmischung mit dem Grauguss-Substrat durch Legieren mit Niob zum Abbinden von Kohlenstoff

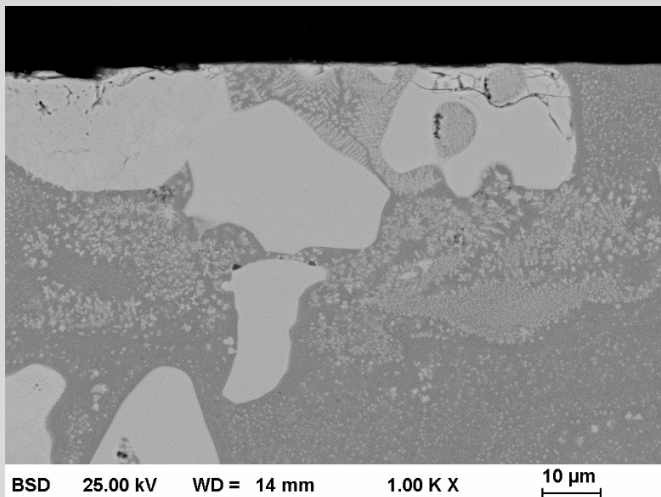


Zusatzwerkstoffentwicklung - Hartstoff

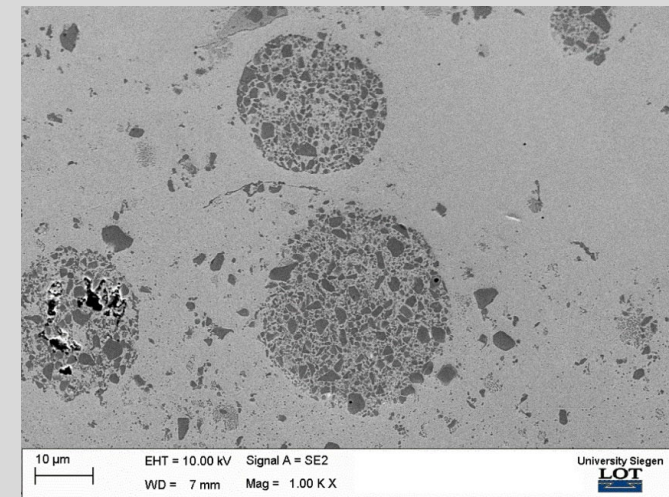
- SiC zeichnet sich durch eine hohe Härte und einen geringen Preis aus, weist aber infolge rapiden Auflösens in Stahlschmelzen und Bildung spröder Silizide eine schlechte metallurgische Kompatibilität zu Stahlmatrices auf
- W_2C/WC zeichnet sich durch hohe Härte und etablierte Herstellungsrouten aus, bildet nach Lösen in Stahlschmelze aber spröde Mischcarbide, weist einen hohen (volumenbezogenen) Preis auf und erfordert den Einsatz kritischer Rohstoffe
- NbC zeichnet sich durch hohe Härte und optimale metallurgische Kompatibilität mit Stahlmatrices aus, weist aber einen hohen Preis auf und > 80% der Niob-Erze werden von Brasilien gefördert

Zusatzwerkstoffentwicklung - Hartstoff

- TiC zeichnet sich durch eine hohe Härte, eine nahezu gleich gute metallurgische Kompatibilität mit Stahlmatrices wie NbC, eine gute Verfügbbarkeit und einen relativ geringen (volumenbezogenen) Preis aus
- Reine Karbidpulver erfordern ausreichende Größe für sicheres Fördern, wodurch Rissbildung begünstigt wird

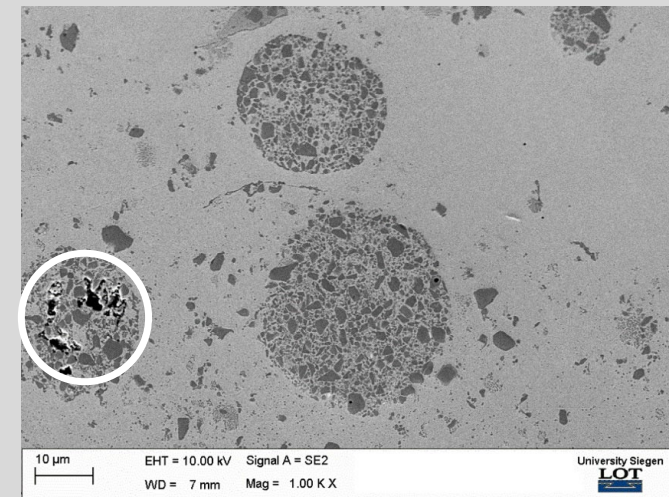
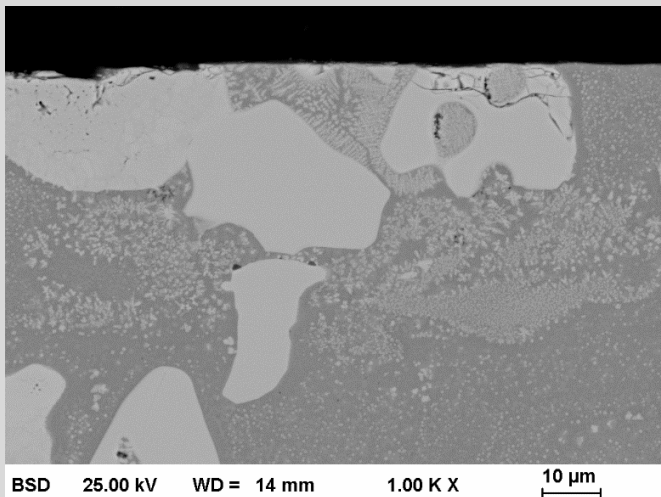


16



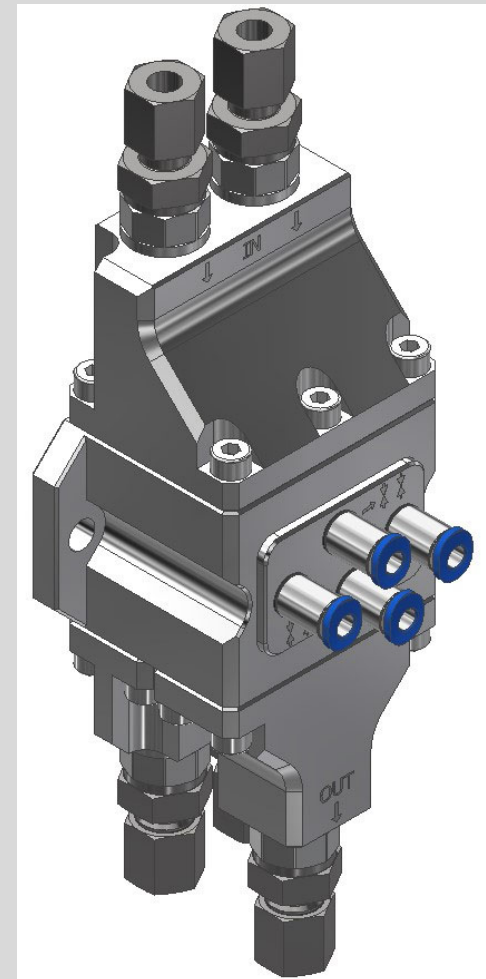
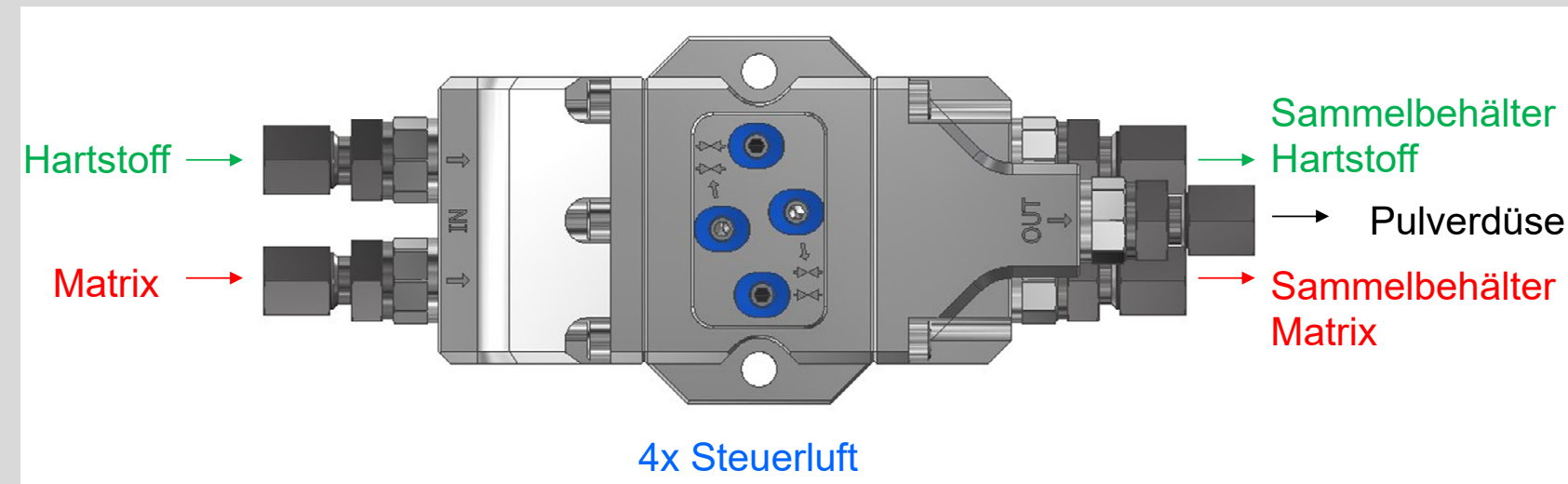
Zusatzwerkstoffentwicklung - Hartstoff

- TiC/FeCr 70/30 Verbundpulver mit $\sim 1 \mu\text{m}$ großen Karbidpartikeln bewirken geringe Rissanfälligkeit
- Nicht infiltrierte Poren begünstigen Bildung von Ausbrüchen beim Schleifen; Vermeidung von Poren durch Sintern und Brechen oder „Dichtsintern“

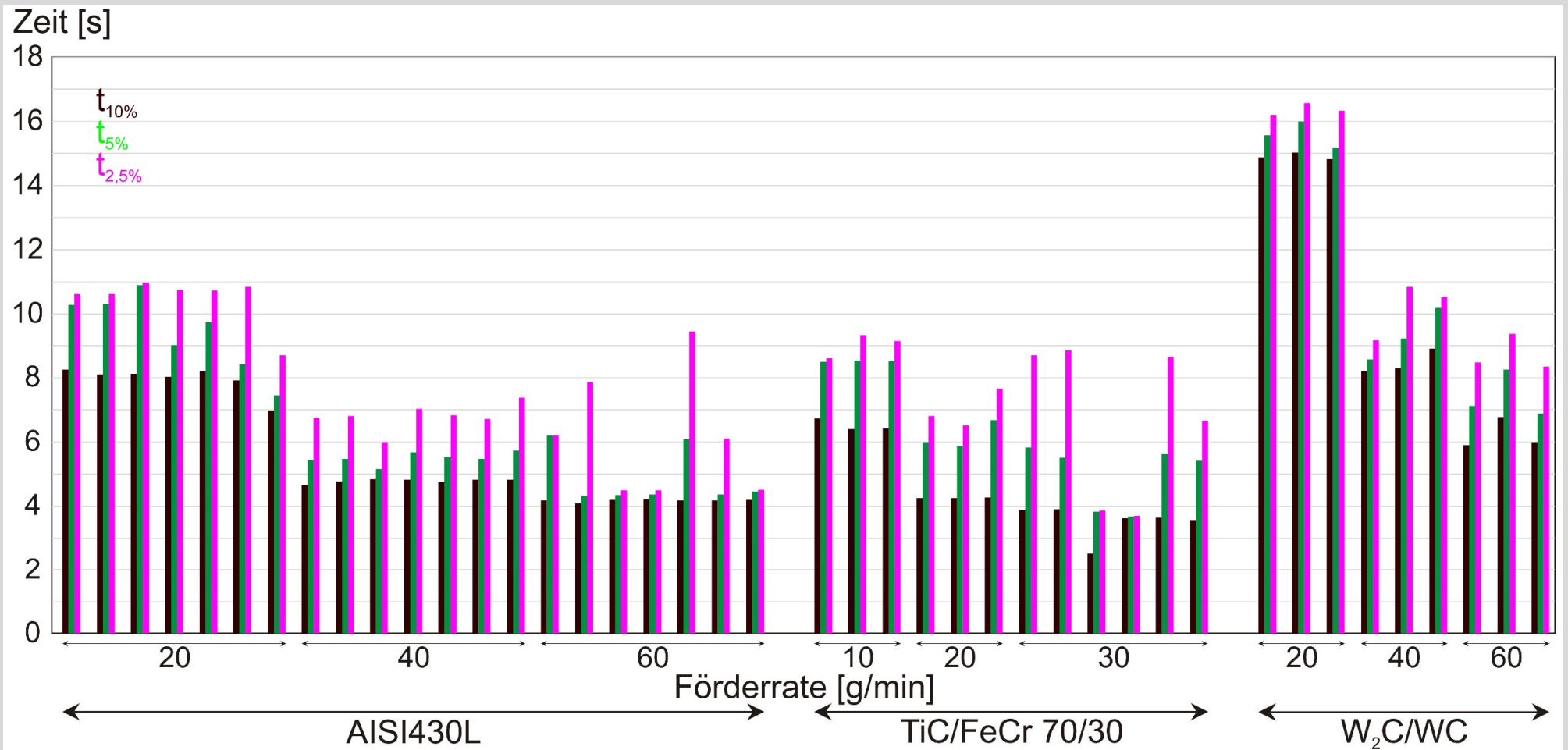


Hardwareentwicklung (PowderQuickSwitch)

- Quetschventilbasierte Pulverumschaltung zwischen Pulverdüse und Pulverauffangbehältern



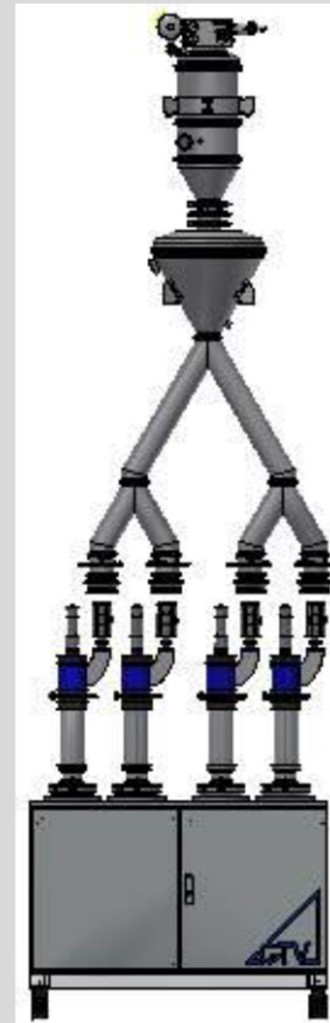
PQS Charakteristik





Automatisches Nachfüllen von Pulvern

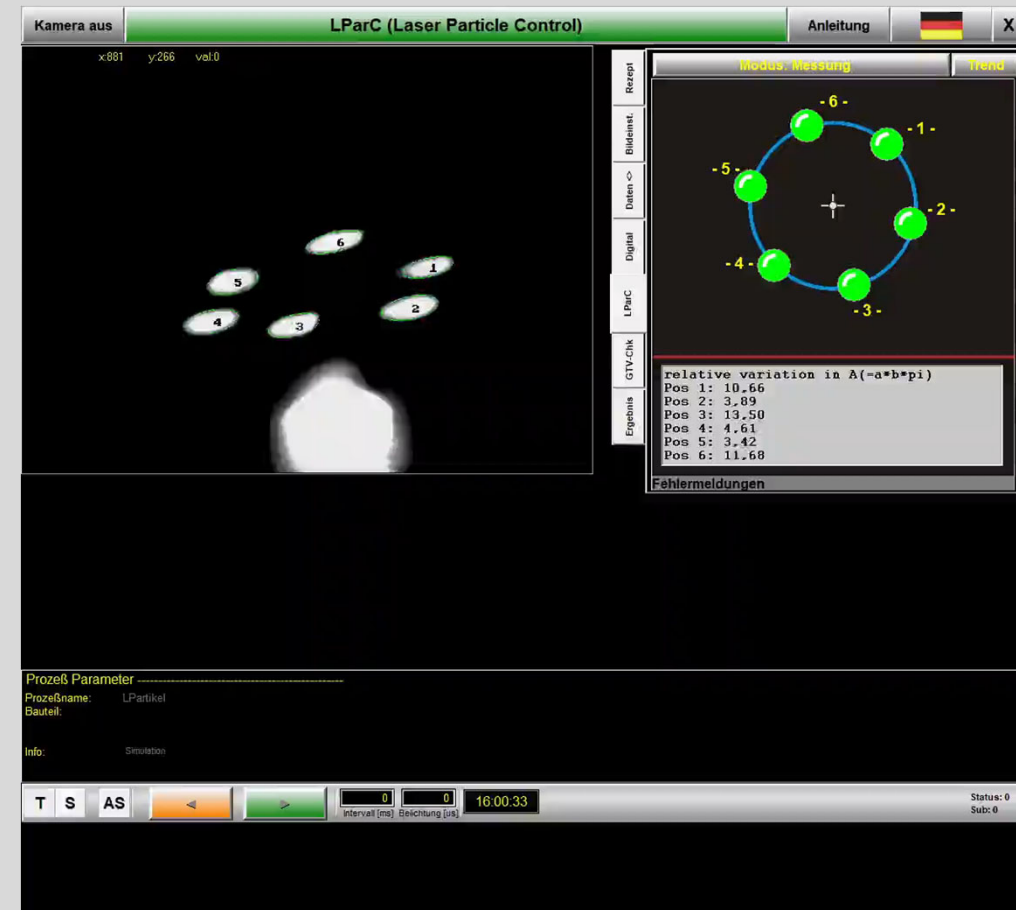
- Vermeidung von Sonderabfall in Form von Plastik-Pulverflaschen
- In der PBF-LB/M Technologie bewährte Pulverförderertechnik kombiniert mit in Dreischicht-Produktion bewährter GTV Waage-Pulverförderertechnologie mit entkoppeltem Strang zum Nachfüllen von Pulvertöpfen im drucklosen Zustand
- Befüllen der Vorratsspeicher durch Vakuumförderung aus BigBags oder Glove-Boxen zum Entleeren von Pulvereimern in Silos





GTV Online Pulverstrahlen-Monitoring

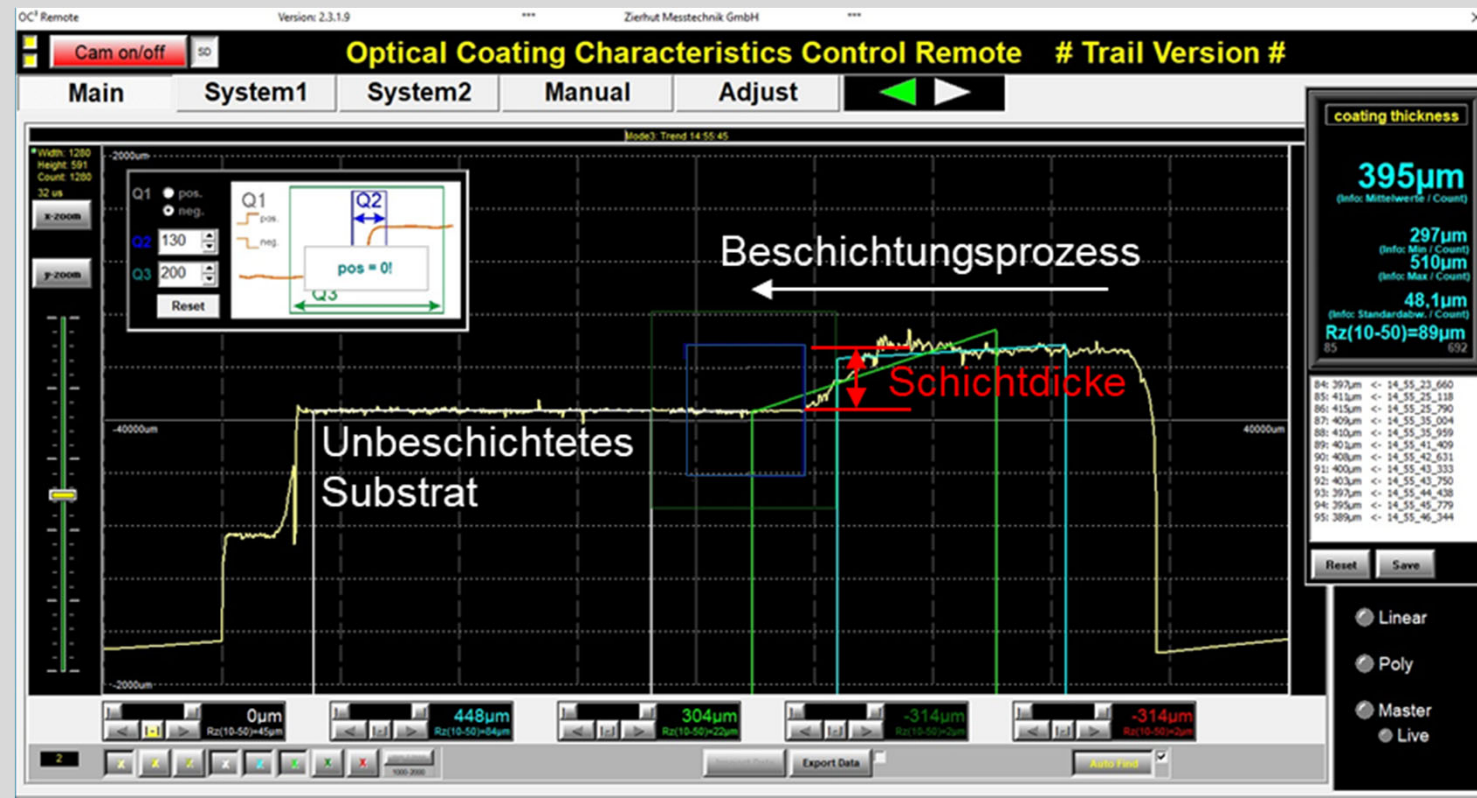
- Auswerten von mittels Linienlaser beleuchteter Ebene unmittelbar unter der Düse
- Laterale Kameraanordnung für Detektion beleuchteter Pulverstrahlen notwendig
- Erkennen von Pulverstau, pulsierenden Pulverströmen und Strahlgeometrieänderungen bspw. aufgrund von Anbackungen





GTV Schichtdickenzuwachs-Monitoring

- Basierend auf mittels Lasertriangulation ermitteltem Distanzunterschied von fortlaufend aufgetragener Lage und noch nicht beschichteter Oberfläche



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

