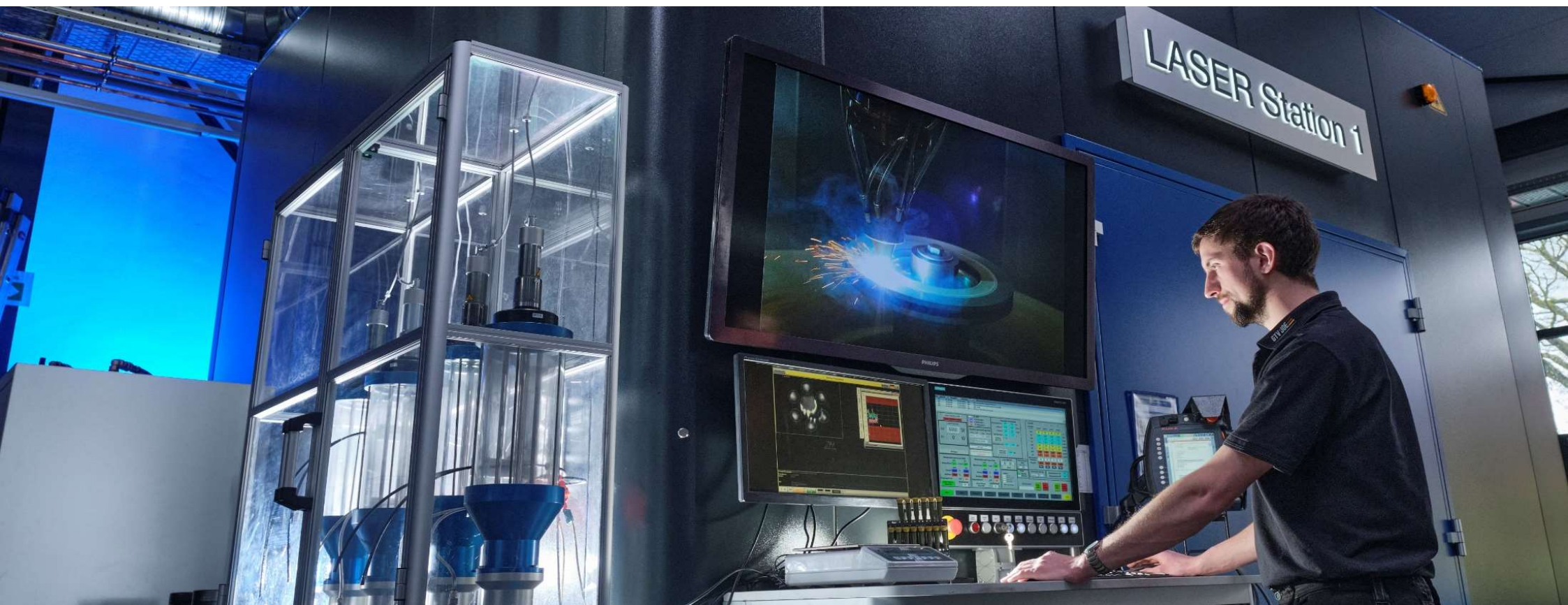




Fortschrittliche Technologien für hoch-automatisierte Laser Cladding Prozesse

Andreas Wank

13. Laser Anwender Forum, Bremen, D, 27.-28.11.2024



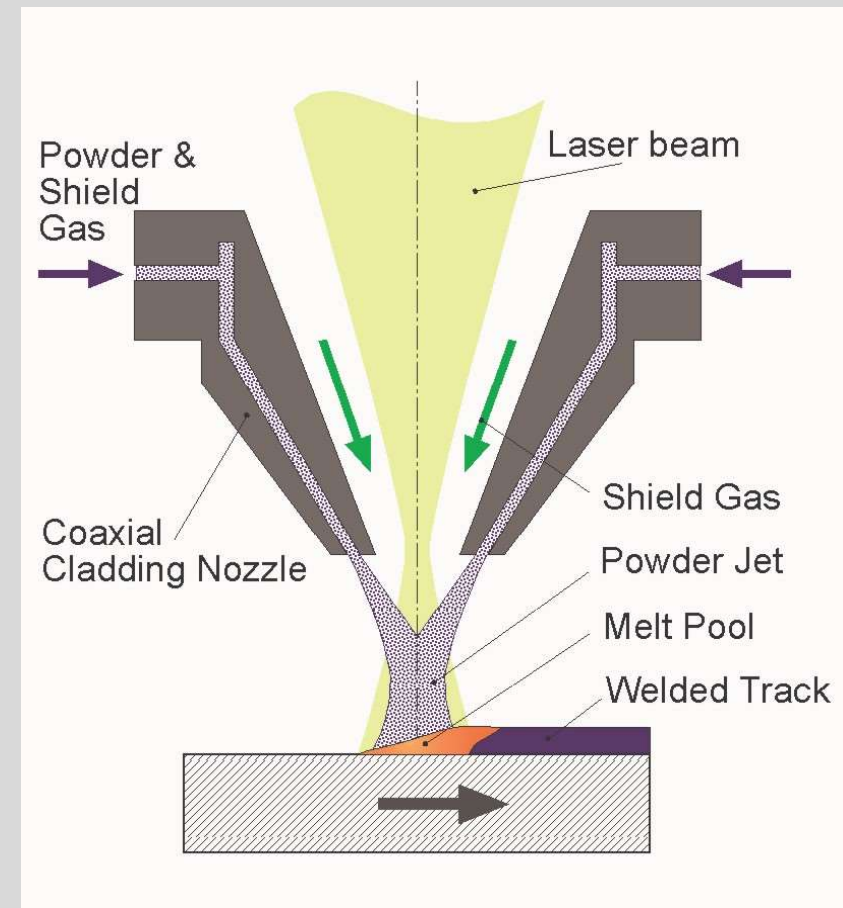


Gliederung

- Grundlagen des (Hochleistungs-) Laser-Pulver-Auftragschweißens am Anwendungsbeispiel beschichteter Grauguss-Bremsscheiben
 - Einfluss von Pulverstrahlkontrolle
 - Einfluss von Strahlformung
- Konzept für optimale Prozesskontrolle
- Pulverstrahlstabilität im unterbrochenen Prozess
- Werkstoffentwicklungen

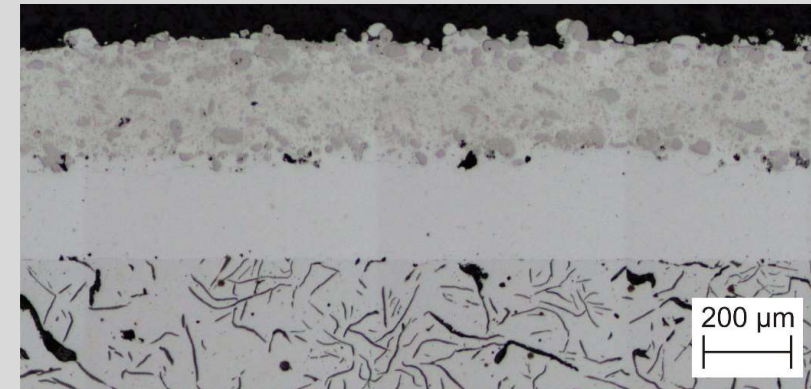
Laser-Pulver-Auftragschweißprozess

- Pulvereigenschaften, Partikel- und Laserstrahlgeometrie sowie Partikelgeschwindigkeit definieren den Wärmeübertrag auf Partikel im Flug und in die Bauteiloberfläche
- Konstanz von Pulvermassenstrom, Partikelstrahlgeometrie und -geschwindigkeit bestimmt Homogenität von aufgetragenem Material (bei konstanten Wärmeabfuhrbedingungen)



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



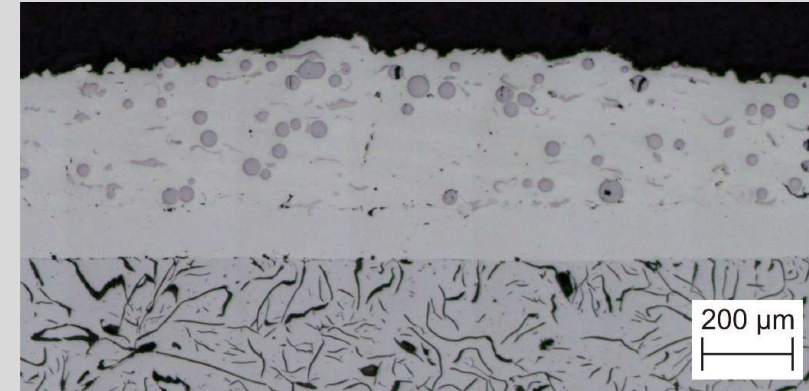
28/29/27/27 g/min AISI 430L
17/17 g/min TiC/FeCr 70/30



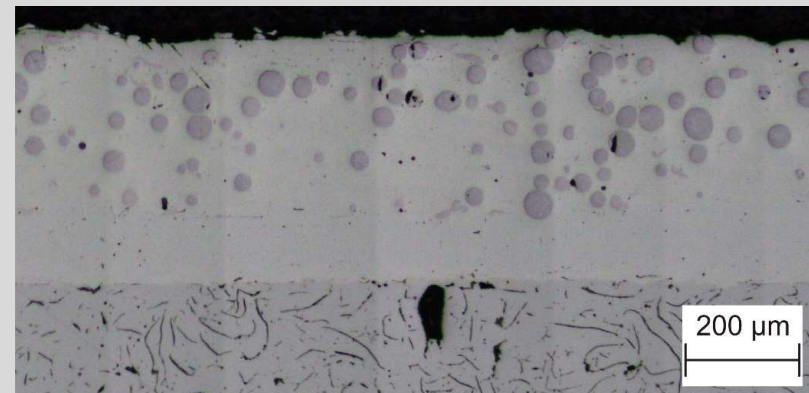
32/32/24/23 g/min AISI 430L
21/13 g/min TiC/FeCr 70/30

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



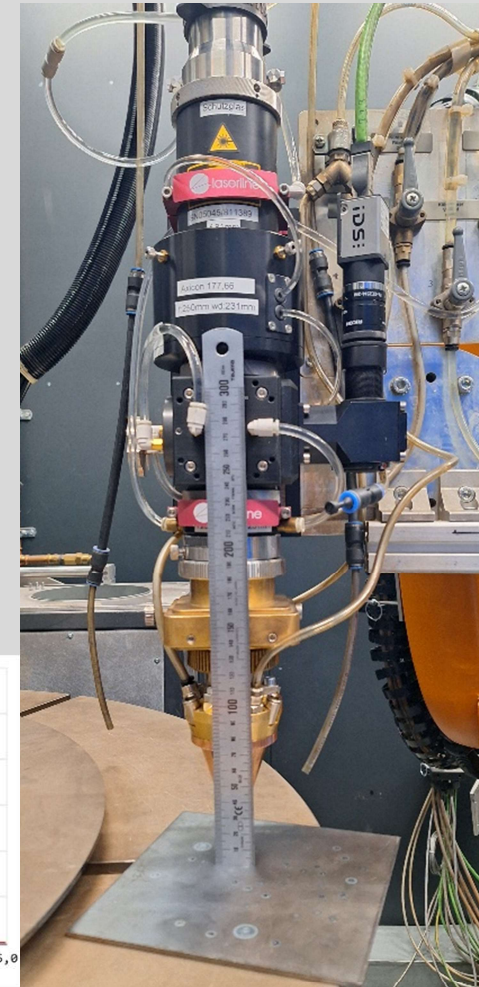
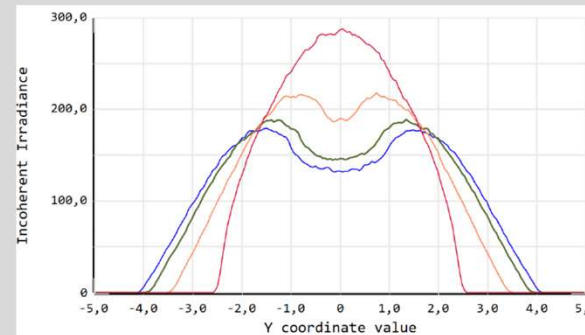
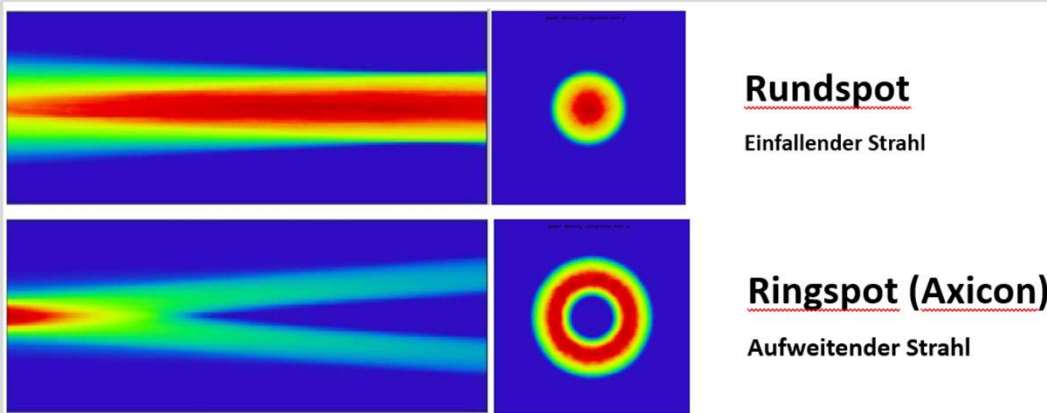
Trägergas Ar, WSC_s 2x 4 l/min



Trägergas Ar, WSC_s 2x 6 l/min

Einfluss der Strahlformung

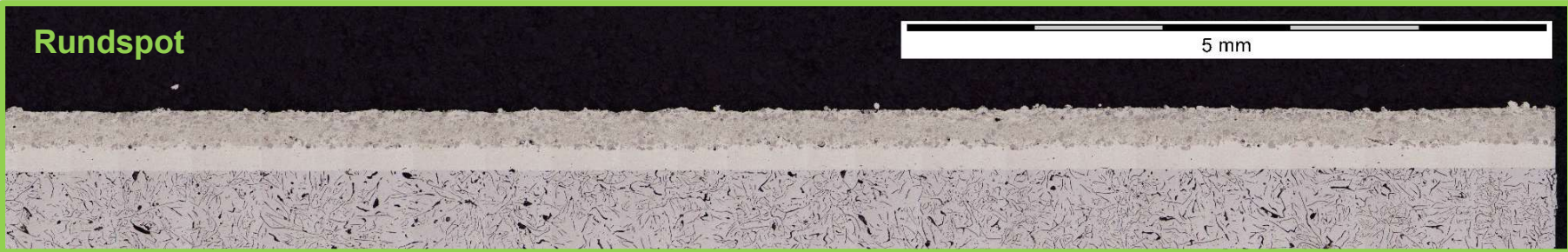
- Einsatz eines Axicons zum Erzeugen eines Ringspots
- Einflussnahme auf Wechselwirkung von Pulver- und Laserstrahl sowie auf Verteilung des Wärmeeintrags in das Substrat
- Variation mit Defokussierung für d_i / d_a von Schmelzpunkten zwischen 0,8 mm / 4,6 mm bis 5,3 mm / 7,6 mm



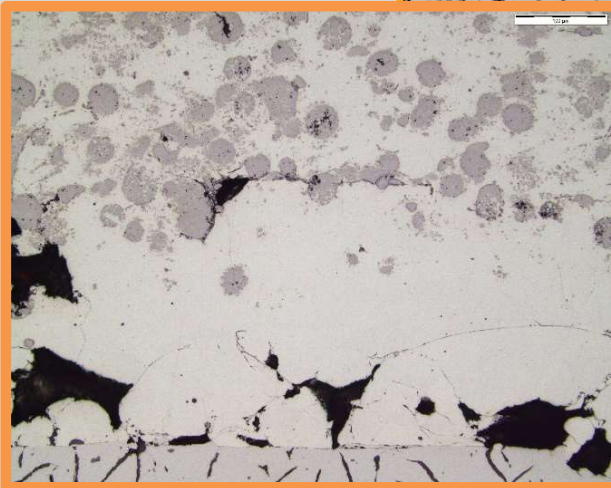
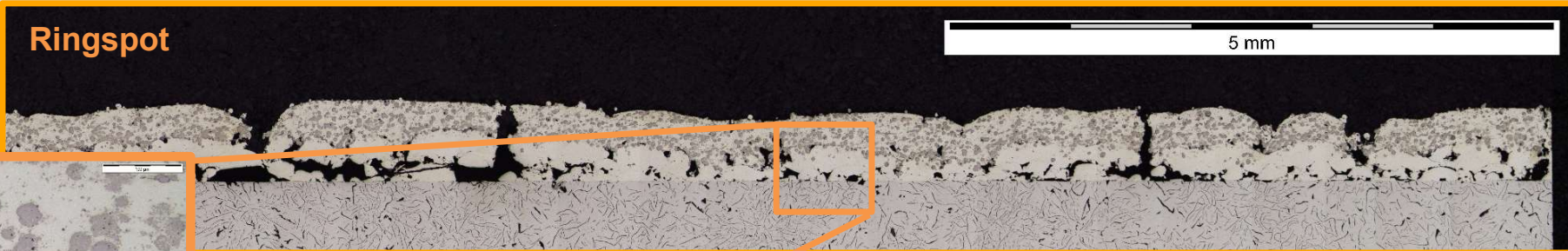


Einfluss der Strahlformung

DE: 91,3 %
R_a/R_z: 9,6/60 µm



DE: 95,6 %
R_a/R_z: 25,9/166 µm



	Leistung [kW]	Förderrate [g/min]	Oberflächen- geschw. [m/min]	Spurversatz [mm]
Lage 1	19,5	151	200	0,5
Lage 2	22,0	146	150	0,43

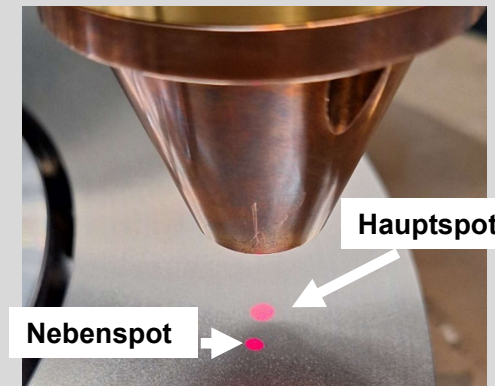
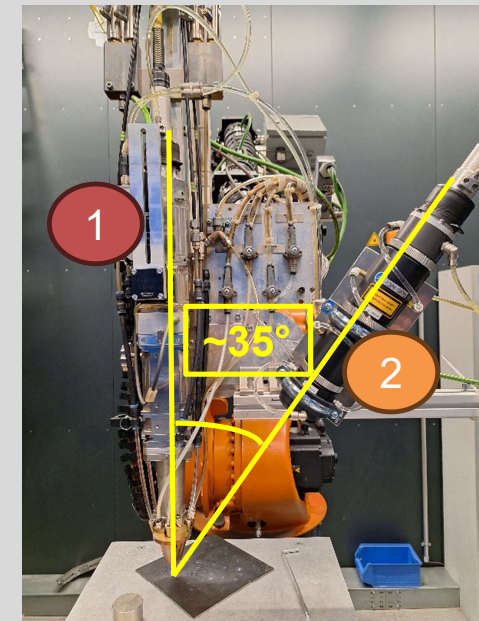


Einfluss der Strahlformung

- Ringspots mit größerem Außendurchmesser ermöglichen noch geringfügige Verbesserungen des Pulvernutzungsgrads im Vergleich zu Rundspots
- Reduzierter Wärmeeintrag in Bauteiloberflächen und / oder Pulverpartikel infolge verkürzter Interaktionsräume lässt nur reduzierte Depositionsraten für das Herstellen hochwertiger Schichten zu
- Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen keine Verbesserung der Produktivität oder Prozessstabilität für Verwendung von Ringspots ableitbar

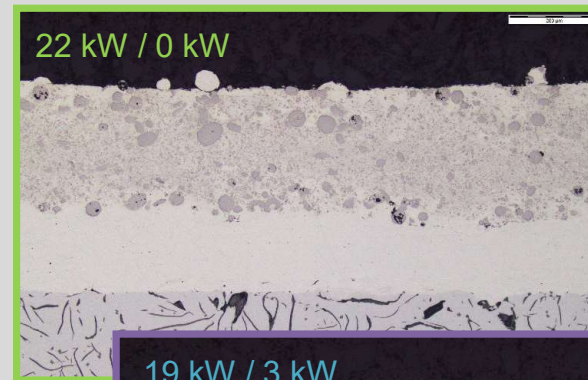
Einfluss der Strahlformung

- Untersuchungen zum Nutzen von Doppelstrahltechnik unter Einsatz von 2 getrennt regelbaren Laserquellen (22 / 6 kW) und 2 gegeneinander verstellbaren Bearbeitungsköpfen
- Beschichtungskopf mit senkrecht auftreffendem Pulver- und Laserstrahl (5 mm Durchmesser Rundspot)
- Elliptisch auftreffender Nebenspot mit Halbachsen 3 / 4 mm sowie 4 / 5 mm durch Wechsel von Fokussierlinsen
- Versuchsreihen unter Variation von Abstand und räumlichem Versatz der Spots (vorlaufend / nachlaufend)

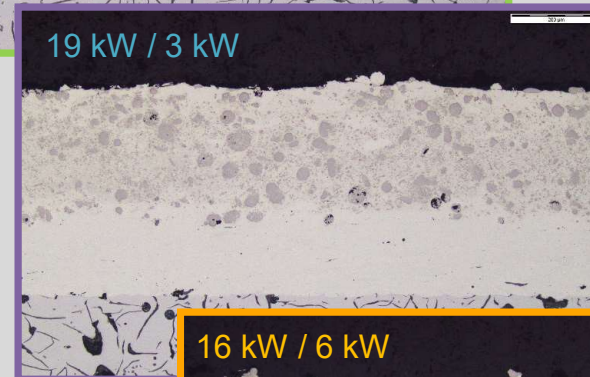


Einfluss der Strahlformung

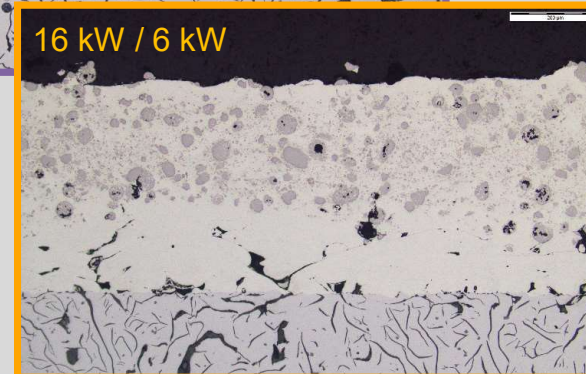
- Schichtqualität wird primär über den Hauptspot definiert
- Mit zunehmendem Abstand und Leistungsanteil im Nebenspot sinkt anwendbare Pulverfördererrate



DE: 92,0 %
Dicke: 473 μm
 R_a : 9,2 μm
 R_z : 57 μm
Anbindng_{S-1L}: 99,6%
Anbindung_{1L-2L}: 99,1%



DE: 91,2 %
Dicke: 468 μm
 R_a : 9,9 μm
 R_z : 63 μm
Anbindung_{S-1L}: 98,9%
Anbindung_{1L-2L}: 98,9%



DE: 91,8 %
Dicke: 481 μm
 R_a : 12 μm
 R_z : 76 μm
Anbindung_{S-1L}: 94,4%
Anbindung_{1L-2L}: 97,3%

	Förderrate [g/min]	Oberflächen- geschwindigkeit [m/min]	Spur- versatz [mm]
Lage 1	151	200	0,5
Lage 2	146	150	0,43

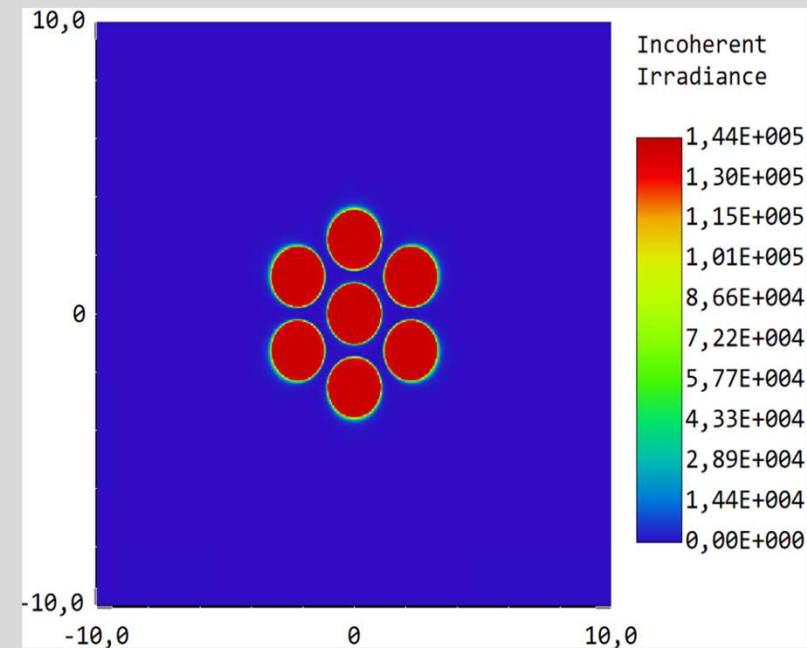


Einfluss der Strahlformung

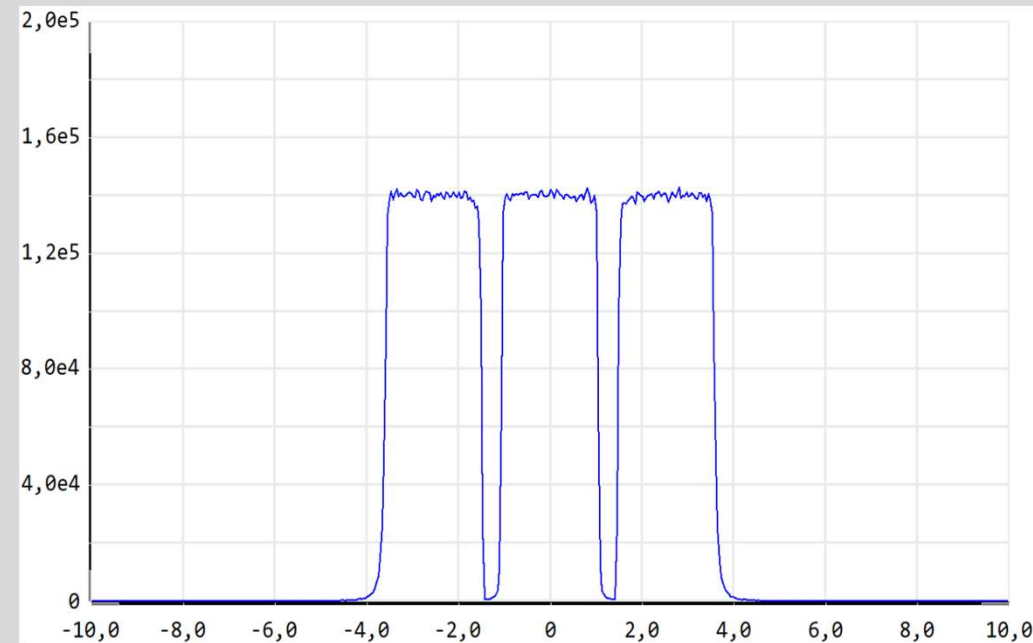
- Vorlaufender Nebenspot ermöglicht Vorreinigung der Bauteiloberfläche, sofern diese benötigt wird
- Nachlaufender Nebenspot ermöglicht reduzierte Abkühlrate, was ggf. für das Beschichten mit rissempfindlichen Werkstoffen genutzt werden kann
- Ohne dynamische Strahlausrichtung Richtungsabhängigkeit zu beachten
- Komplexere Prozessführung und -kontrolle erforderlich
- Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen keine Verbesserung der Produktivität oder Prozessstabilität für Verwendung von Doppelstrahltechnik ableitbar

LB-DED - Optimale Prozesskontrolle

- Überlagern separater, geregelter Laserstrahlen mit quasi-koaxial zugeführten, separat geregelten Pulverstrahlen ermöglicht sowohl Kontrolle über Wärmeeintrag in Pulverkomponenten als auch Anpassung an Wärmeabfuhrbedingungen



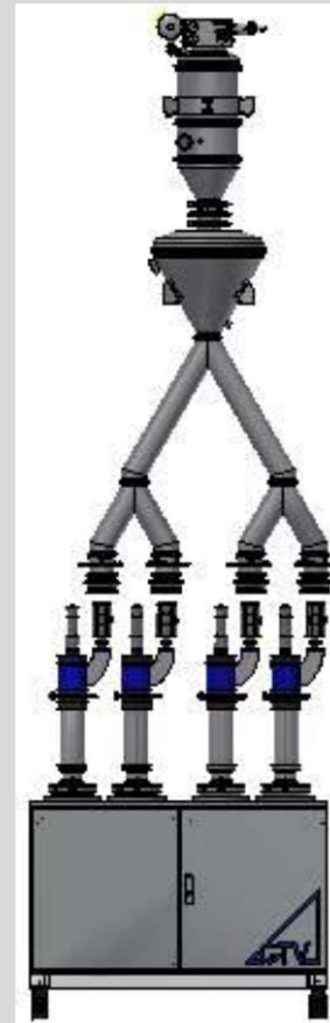
12





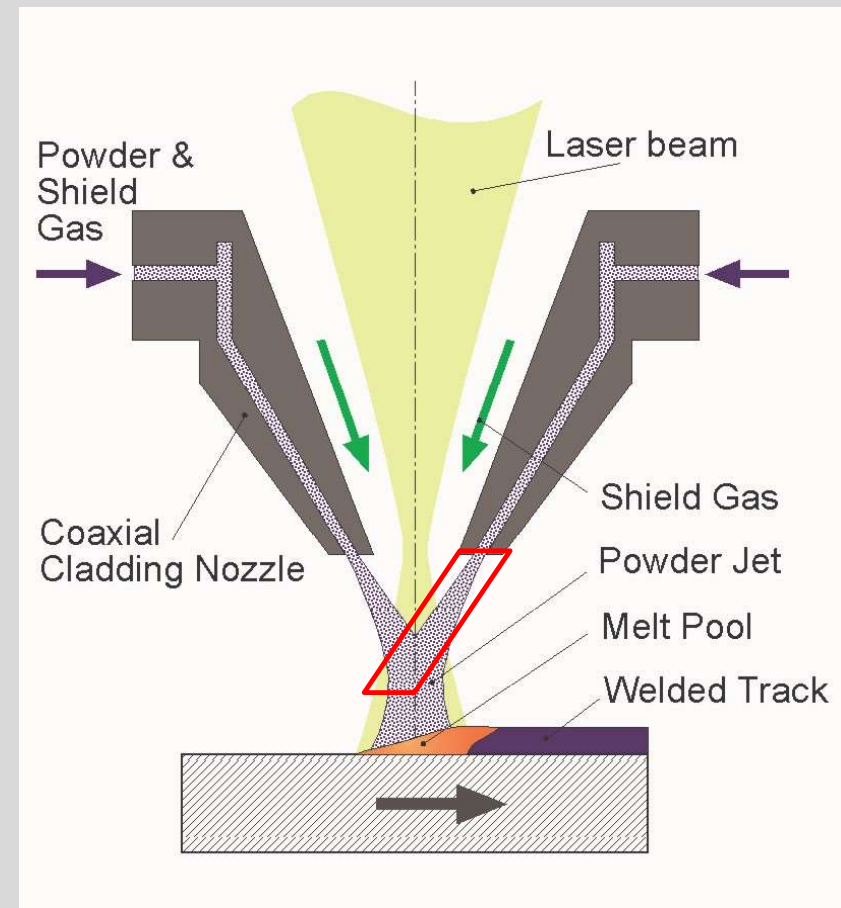
Automatisches Nachfüllen von Pulvern

- 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



Pulverstrahlstabilität

- Digitale Bildauswertung beleuchteter Pulverstrahlen, die aus einzelnen Bohrungen von Laser-Pulverdüsen austreten
- Analysen zur Stabilisierung von Pulverstrahlen nach dem Umschalten zwischen zwei verschiedenen Pulverwerkstoffen

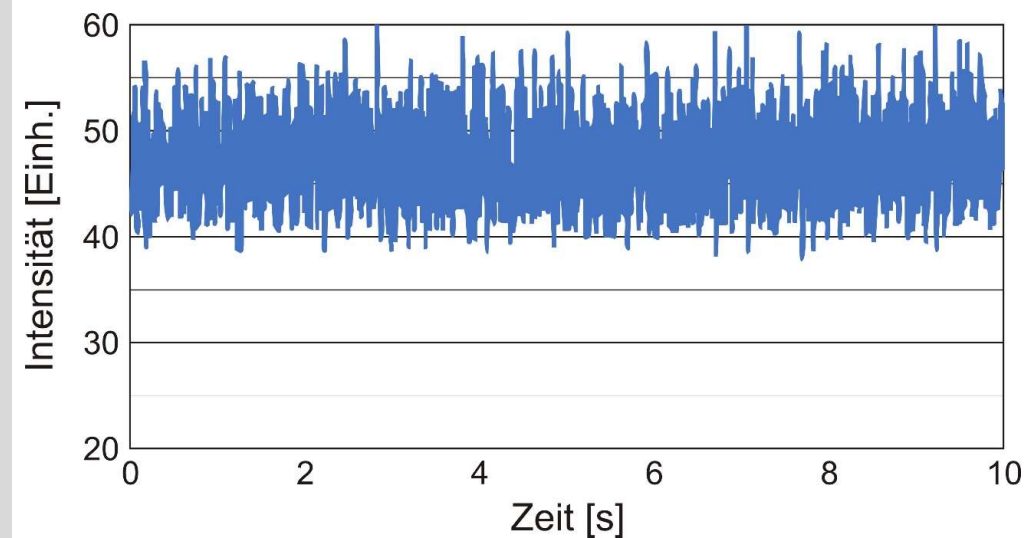




Pulverstrahlstabilität

- Über die Dauer des Auftrags einer qualitativ hochwertigen Lage werden bei hoher zeitlicher Auflösung stabil starke Fluktuationen des Messsignals beobachtet

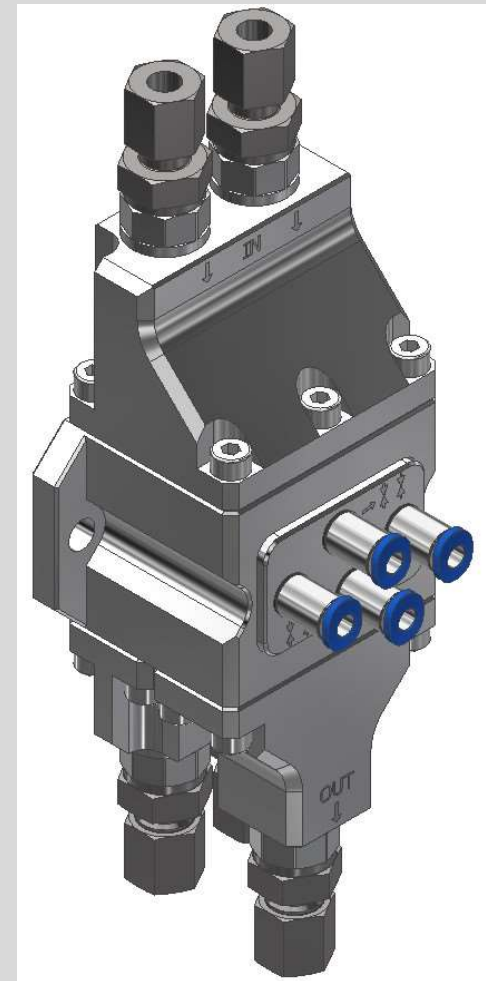
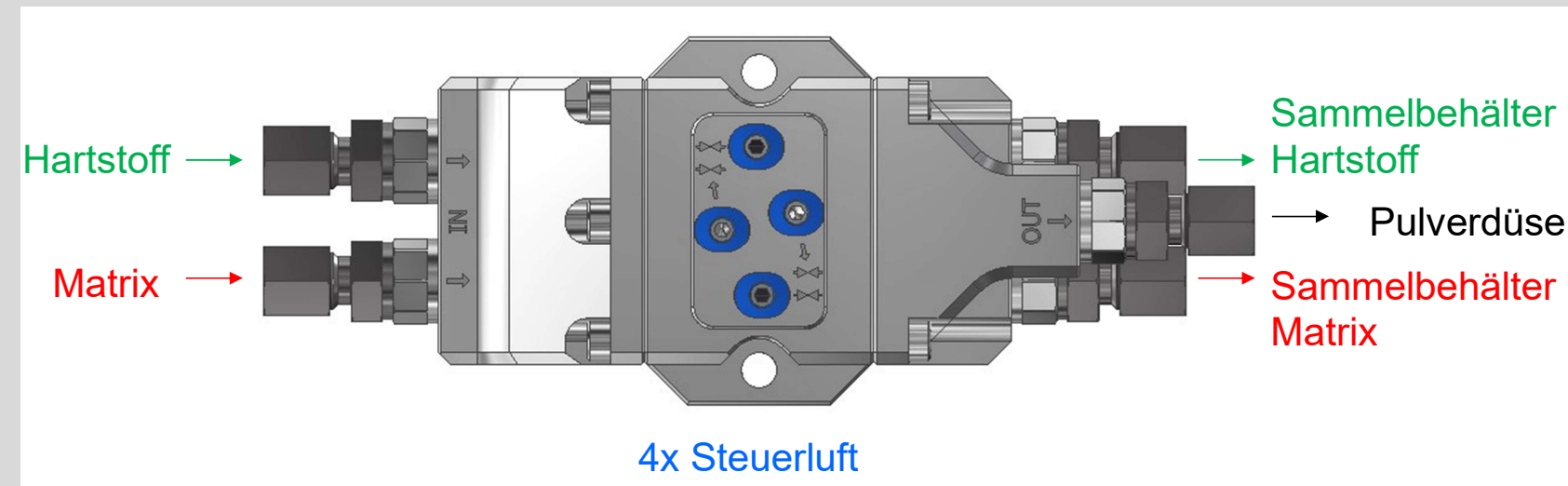
Pulver:	AISI430L, inertgasverdüst
Förderrate:	60 g/min
Helligkeit:	47,0 +16,2/-9,0 [+34%/-19%]
Avg. 0,225s:	46,9 ±1,5 [3,2%]





GTV Pulverschnellschaltung (PQS)

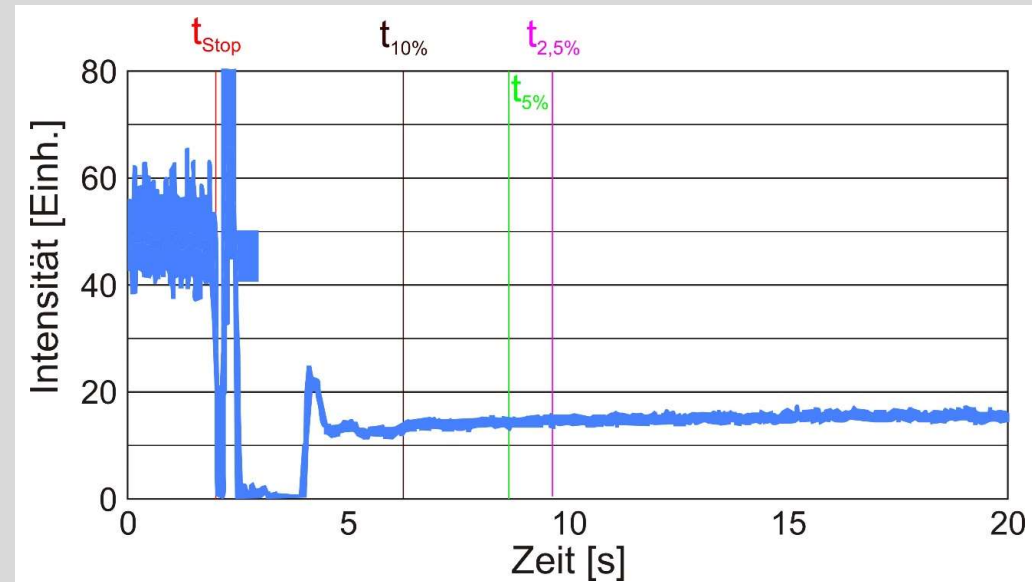
- Quetschventilbasierte Pulverumschaltung zwischen Pulverdüse und Pulverauffangbehältern



Pulverstrahlstabilität im unterbrochenen Prozess

- Nach Umschalten der Linie 1 auf den Auffangbehälter Entleeren des im hinteren Strang befindlichen Pulvers
- Füllen des Totraums der Linie 2 bevor Pulverfluss zur Düse einsetzt
- Stabilisieren der Druckverhältnisse und des darauf beruhenden Pulverstroms der Linie 2 aus der Pulverdüse

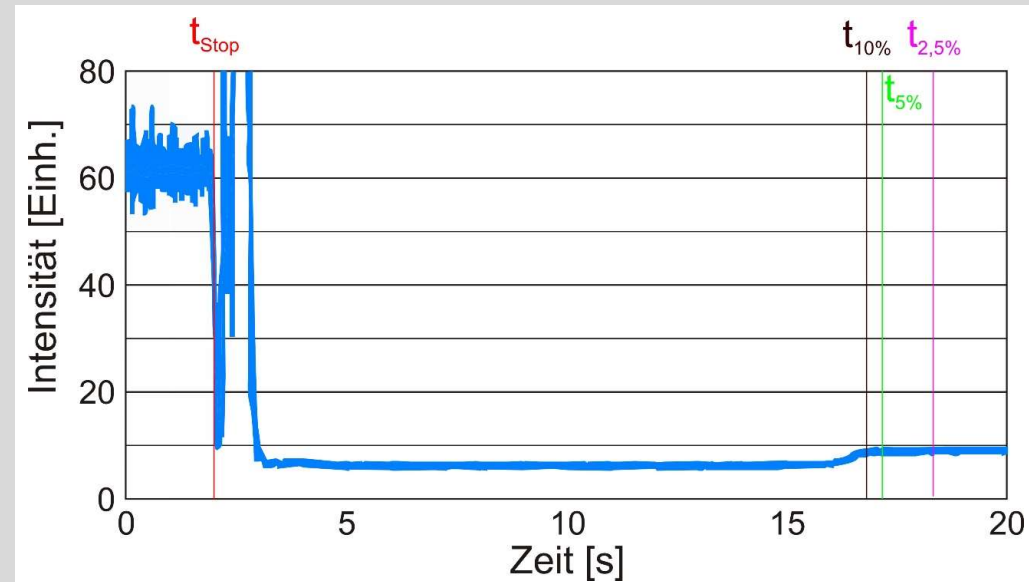
Pulver1:	AISI430L, inertgasverdüst
Förderrate1:	60 g/min
Pulver2:	TiC/FeCr 70/30, aggl. / ges.
Förderrate2:	20 g/min
$t_{10\%}$:	4,3 s
$t_{5\%}$:	6,7 s
$t_{2,5\%}$:	7,7 s



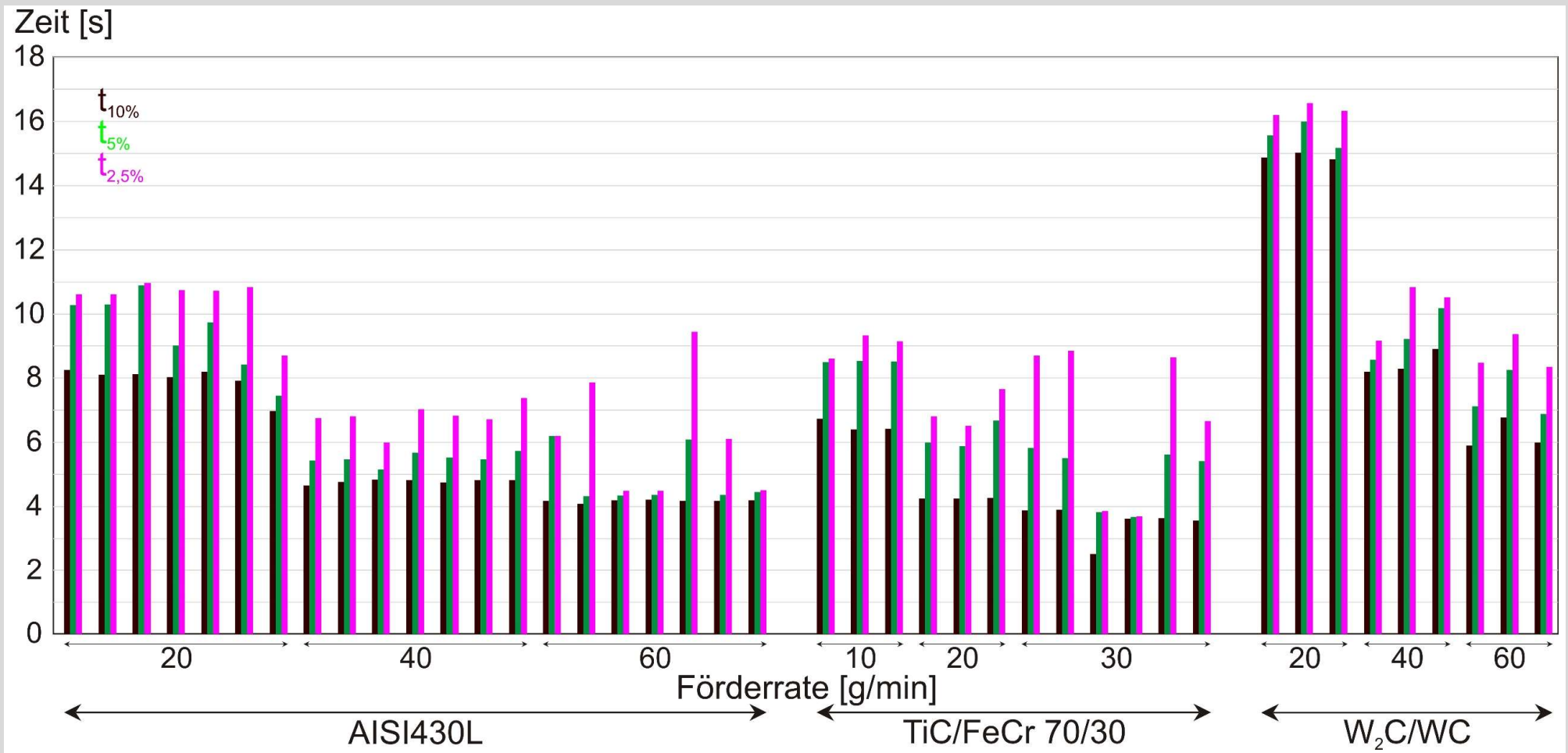
Pulverstrahlstabilität im unterbrochenen Prozess

- Stabilisierung geringer Förderraten von W_2C/WC Hartstoff bis auf maximal 2,5% / 10% Abweichung vom vollstabilisierten Zustand innerhalb von ca. 14 s / 17 s

Pulver1:	AISI430L, inertgasverdüst
Förderrate1:	60 g/min
Pulver2:	W_2C/WC , plasmasph.
Förderrate2:	20 g/min
$t_{10\%}$:	14,8 s
$t_{5\%}$:	15,2 s
$t_{2,5\%}$:	16,3 s

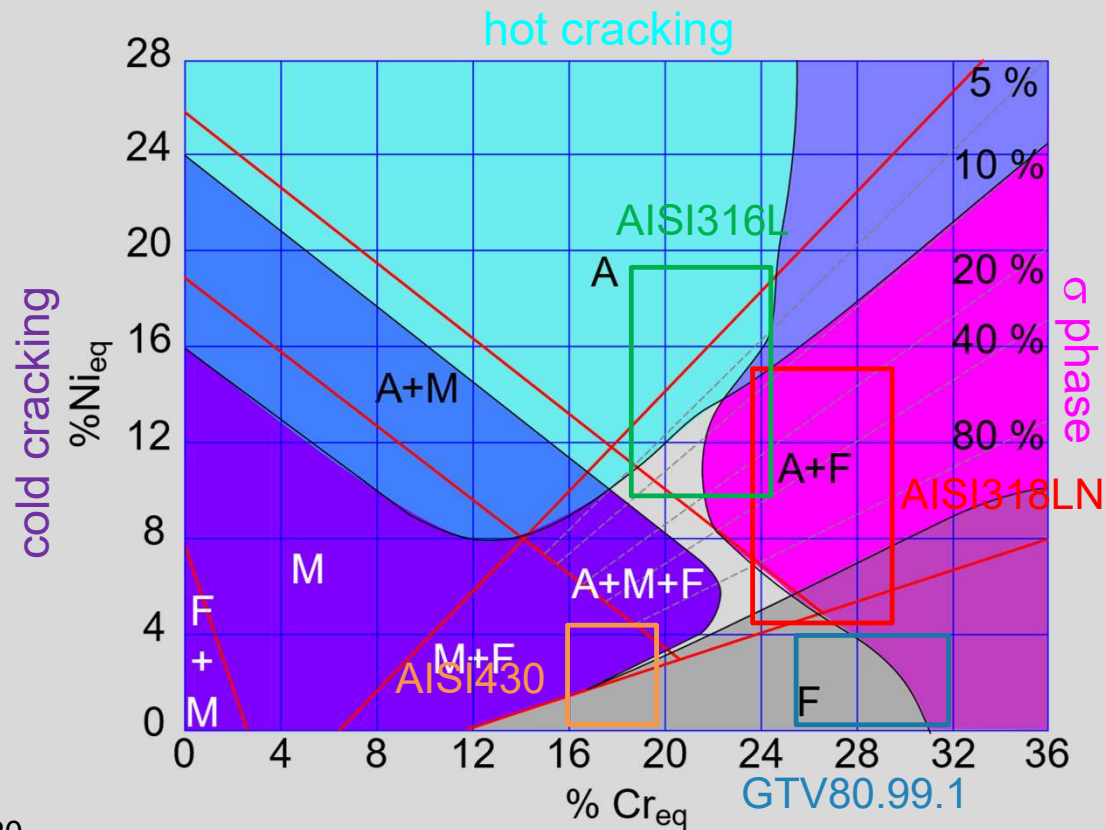


Pulverstrahlstabilität im unterbrochenen Prozess



Werkstoffentwicklungen - Matrix

- Vermeidung von Sigma-Phasen-Bildung
- Vermeidung von Heiß- und Kaltrissen
- Vermeidung der Legierungselemente Co, Ni, Cu (und W)
- Beständigkeit gegen Lochfraßkorrosion absichern
- Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion auch im Fall von Aufmischung mit dem Grundwerkstoff



Werkstoffentwicklungen - Hartstoff

- NbC und TiC weisen bestmögliche metallurgische Kompatibilität mit Matrices auf Eisenbasis auf; Ausscheiden reiner Monocarbide nach Auflösen in Schmelze
- Einsatz feiner Hartstoffe ($\sim 1 \mu\text{m}$) bewirkt geringe Rissanfälligkeit
- Verbundpartikel mit metallischer Matrix sind unempfindlich in Bezug auf Feuchtaufnahme
- Dichte Verbundpartikel (agglomeriert, dicht gesintert / gesintert, gebrochen) verhindern Fehlstellenbildung
- Sphärische Partikel ermöglichen besonders vorteilhafte Förderstabilität



Zusammenfassung

- Anforderungen aus dem Bereich der Bremsscheibenentwicklung führten zu einer Vielzahl von Neu- und Weiterentwicklungen von Anlagentechnik und Prozessdiagnostik für das Laser-Pulver-Auftragschweißen sowie von Beschichtungswerkstoffen, die nicht den Einsatz kritischer Rohstoffe erfordern
- Kontinuierliche Weiterentwicklungen lassen Ausweiten der Anwendungen des Laser-Pulver-Auftragschweißens für die Massenfertigung erwarten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

