

Kontrolle von Pulverströmen in der laserbasierten additiven Fertigung

A. Wank, E. Hauser, C. Schmengler, M. Mülln, T. Königstein, GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach, D

Der Füllgrad von Tellernuten in Scheibenförderern wird mittels Lasertriangulation ermittelt. Eine Korrelation des Nutfüllungsgrads mit der Pulverfördertrate wird nachgewiesen. Anwendungsmöglichkeiten für das Aufbauen besonders effektiver Regelkreise zum Erzielen konstanter Pulverförderraten und für das Ermitteln optimaler Parameter und Hardware-Setups zum Betreiben von Scheibenförderern werden diskutiert. Das Stabilisierungsverhalten nach Umschaltvorgängen wird am Beispiel einer auf Quetschventilen basierenden Umschalteneinheit mittels digitaler Bildanalyse beleuchteter Pulverstrahlen, die aus Düsen austreten, untersucht. Die Zeiten zum Erreichen eines stabilisierten Pulverstroms hängen von der Schüttdichte und Fördertrate des Pulvers ab. Aktuelle Entwicklungen zum automatischen Befüllen von Pulverfördertöpfen und das sortenreine Sammeln von Pulvern werden ebenso vorgestellt wie ein Konzept, das eine optimale Kontrolle von laserbasierten additiven Fertigungsprozessen auf der Basis von separat geregelten Laserstrahlen, die jeweils mit einzelnen aus quasi-koaxialen Düsen austretenden Pulverströmen überlagert werden, ermöglicht.

1 Einleitung

Sowohl für die Beschichtungsverfahren des Thermischen Spritzens und Laser-Pulver-Auftragschweißens (Laser Cladding) als auch für das laserbasierte formgebende Auftragschweißen (LB-DED) mit pulverförmigem Zusatzwerkstoff kommen zumeist volumetrische Scheibenförderer zum Einsatz. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sich eine große Bandbreite von Pulvern aus Metallen, Keramiken, Polymeren und Verbundwerkstoffen mit diversen Partikelgrößenverteilungen und -formen fördern lassen. Dabei lässt sich die Pulverfördertrate in weiten Grenzen, d.h. von ca. 0,1 - 100 g/min, definiert einstellen und über lange Zeiträume konstant halten. Das generelle Förderprinzip ist in [1] detailliert beschrieben. Zu unterscheiden sind volumetrische und gravimetrische Regelung. Bei der volumetrischen Regelung wird die Drehzahl der Förderscheibe vorgegeben und die Pulverfördertrate muss durch so genanntes Auslitern, das im DVS-Merkblatt 2322 [2] beschrieben ist, ermittelt werden. Um eine gewünschte Pulverfördertrate einzustellen, muss zunächst die korrespondierende Tellerdrehzahl ermittelt werden. Dieser Aufwand entfällt bei der gravimetrischen Regelung, bei der so genannte Waage-Pulverförderer basierend auf kontinuierlichem Monitoring der Gewichtsabnahme des Pulvervorratsbehälters während des Förderns automatisch die Tellerdrehzahl zum Erreichen einer vorgegebenen Pulverfördertrate anpassen.

Die gravimetrische Regelung bietet neben dem Vorteil des reduzierten Vorbereitungsaufwands auch die Vorteile der kontinuierlichen Überwachung des Pulverförderprozesses mit Meldung des Verletzens von Grenzwerten an den Anlagenbediener und der automatischen Kompensation bspw. von füllstandsbedingten Drifts oder von durch Verschleiß an Fördererkomponenten abrupt auftretenden Änderungen. Somit stellt die gravimetrische Regelung eine Grundlage für eine reproduzierbare Massenfertigung bei minimaler Ausschussrate und für die Fertigung sicherheitsrelevanter Bauteile dar. Im Vergleich zur volumetrischen Regelung wird über längere Messzeiträume eine überlegene Präzision der gemittelten Pulverfördertrate abgesichert. Insbesondere für das Anwenden sehr geringer Pulverförderraten können die auf den Regelzyklen basierenden Schwankungen aber höher ausfallen als bei Anwendung des volumetrischen Regelprinzips [3]. Für diese Betriebsbedingung bietet sich daher das über die Wägezellen überwachte Fördern bei Anwendung der volumetrischen Regelung an, bis ein definierter Grenzwert der Abweichung von der vorgegebenen Pulverfördertrate überschritten wird und ein Kompensieren durch Anpassen der Tellerdrehzahl in einem Schritt erfolgt.

Gesetzliche Bestimmungen, die eine deutliche Reduktion der Partikelemission von Reibbremsen einfordern, haben in den letzten Jahren eine Vielzahl von Entwicklungen im Bereich der Beschichtungstechnik ausgelöst. Das betrifft im Bereich des Laser Claddings neben Prozessentwicklungen, die bei Anwendung von Laserleistungen > 20 kW die Herstellung von Schichten mit einer Lagendicke von ca. 80 - 300 µm zur Minimierung der Herstellungskosten ermöglichen, auch begleitende Zusatzwerkstoffentwicklungen [4]. Darüber hinaus erfuhr die Kontrolle der Pulverströme besondere Beachtung, weil die lokale Verteilung der Pulverpartikeldichte die Qualität der Beschichtungen beeinflusst [5] und infolge der hohen Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 400 m/min bereits kurzzeitiges Pulsen der Pulverströme zu Ausschuss führen kann. Monitoringwerkzeuge, die für die Überwachung des Beschichtungsprozesses entwickelt wurden, charakterisieren die Kontur der aus der Düse austretenden Pulverströme, erfassen deren zeitlich aufgelöste Dimensionen und Intensität sowie die Emissionsintensität, die das Schmelzbad aufgrund der Wechselwirkung mit Pulverströmen und Laserstrahl aufweist, und die Dicke von aufgetragenen Lagen [6].

Im Folgenden werden weiterführende Arbeiten zur Charakterisierung des Förderverhaltens basierend auf der online Überwachung der Nutfüllung von Fördertellern mittels Lasertriangulation präsentiert und Verwertungsmöglichkeiten diskutiert. Darüber hinaus werden aus Pulverdüsen austretende Pulverstrahlen mittels digitaler Bildauswertung in Bezug auf Ihre Stabilität analysiert. Die Analysen schließen das Umschalten zwischen verschiedenen Pulvern, die konsekutiv der Pulverdüse zugeführt werden, mit Ableiten von Umschaltzeiten für das

Absichern eines stabilen, definierten Pulverstroms ein. Der Einfluss diverser Prozessparameter und Pulvereigenschaften auf die Stabilisierungszeiten wird diskutiert. Schließlich wird Anlagentechnik für das automatische Befüllen von Pulverfördertöpfen, das sortenreine Sammeln von Pulvern, die nicht mit dem Laserstrahl in Wechselwirkung treten, und ein Ansatz für eine optimale Steuerung der Wechselwirkung von Laserstrahlen und Pulverströmen mehrkomponentiger Zusatzwerkstoffe vorgestellt.

2 Versuchsdurchführung

Analysen der Nutfüllung von Fördertellern erfolgen unter Verwendung eines Lasertriangulationssensors scan-Control 3010-200 (Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, Ortenburg, D), dessen Messbereich den Förderteller mittig schneidet und den gesamten Durchmesser des Fördertellers abdeckt (**Bild 1**, links). Die Schultern der Tellernut spannen eine Ebene auf, die als Referenz eine vollständig gefüllte Nut repräsentiert. Deren Abstand zu der gemessenen Oberfläche der mit Pulver gefüllten Nut ergibt eine Fläche, die dem nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitt entspricht und kontinuierlich erfasst wird (**Bild 1**, rechts). Für die Untersuchungen werden Förderteller mit einer 5,0 mm breiten und 0,6 mm tiefen Nut verwendet. Inertgasverdüstes AISI316L Pulver in den nominellen Körnungen +20 -53 μm und +53 -150 μm werden bei Anwendung von Tellerdrehzahlen zwischen 1 und 10 U/min gefördert. Für konventionelle Scheibentransporter stellt eine Tellerdrehzahl von 10 U/min das Maximum des Regelbereichs dar.

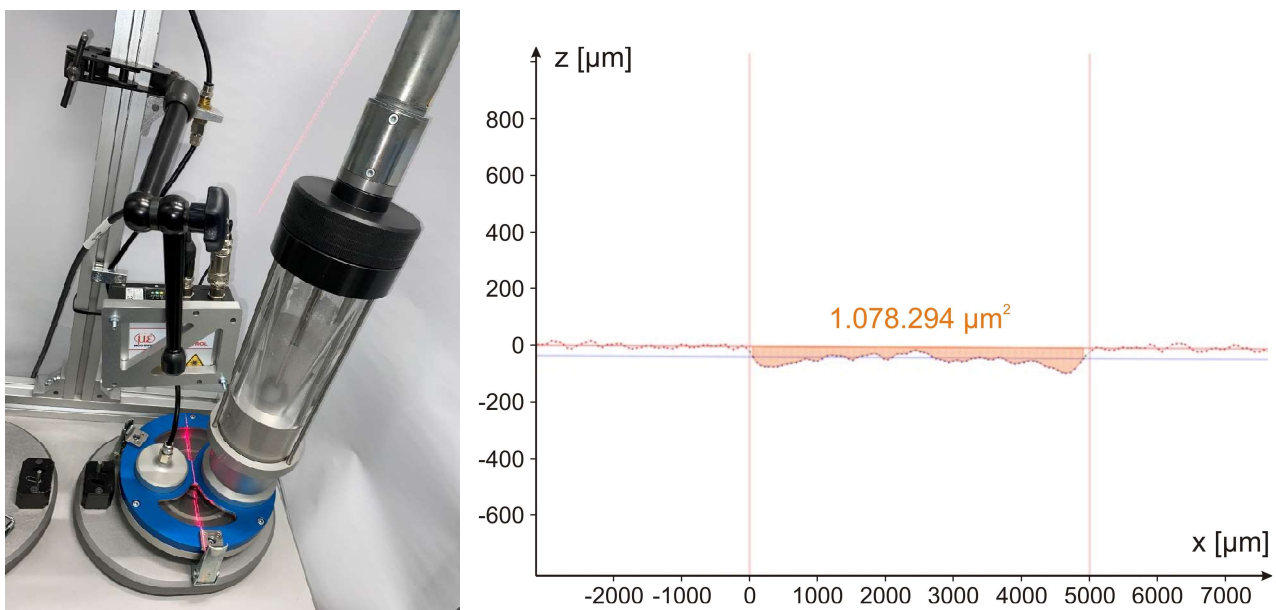


Bild 1. Versuchsaufbau für Analysen der Nutfüllung von Fördertellern durch gefördertes Pulver mit Hilfe eines Lasertriangulationssensors (links, Messbereich rot beleuchtet) und Auswertung bezüglich des nicht gefüllten Querschnitts anhand von Messdaten (rechts, nicht gefüllter Nutquerschnitt orange hinterlegt).

In Stichversuchen mit einer Förderdauer von einer Stunde werden die Daten der Tellerdrehzahl sowie der auf Basis der Gewichtsabnahme des Pulvertopfs ermittelten Pulverförderate den Daten des nicht gefüllten Nutquerschnitts gegenübergestellt. Für diese Untersuchungen kommen Förderteller mit einer 3,5 mm breiten und 0,3 mm tiefen Nut sowie inertgasverdüstes AISI316L-Pulver in der nominellen Körnung +20 -53 μm zum Einsatz.

Analysen zu erforderlichen Stabilisierungszeiten beim Umschalten zwischen unterschiedlichen Pulvertypen erfolgen für den Einsatz einer Umschalteneinheit GTV PQS (Powder Quick Switch, GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach, D), deren Funktionsprinzip in **Bild 2** dargestellt ist. Als Pulvertypen kommen typische Beschichtungswerkstoffe für den Schutz von Reibflächen von Fahrzeugbremsen mit sehr unterschiedlicher Schüttdichte zum Einsatz. Neben inertgasverdüstem AISI430L-Pulver werden agglomeriertes und gesintertes TiC/FeCr 70/30-Pulver und sphärisches Wolframschmelzcarbid-Pulver ($\text{W}_2\text{C}/\text{WC}$) verwendet. Die Schüttdichten und die angewendeten Pulverförderaten, die jeweils für die Produktion relevante Bereiche abdecken, sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Das Ermitteln der erforderlichen Stabilisierungszeiten erfolgt auf der Basis digitaler Bildauswertung von CCD-Kamerabildern, die mit einer Bildrate von 409 fps aufgezeichnet werden und den mittels einer LED-Lampe beleuchteten, aus der Düse austretenden Pulverstrahl erfassen (**Bild 3**). Über den Umschaltzeitpunkt hinaus wird die Helligkeit 30 s lang aufgezeichnet und eine gleitende Mittelwertbildung über 0,225 s angewendet. Ausgehend vom Ende der Aufzeichnungen wird ermittelt, zu welchem Zeitpunkt die Helligkeitskurve erstmals aus einem Band mit einer maximalen Abweichung von 2,5%, 5% und 10% fällt, um den Zeitraum ab der

Aktivierung der Umschaltung zu definieren, nach dem eine entsprechende Annäherung an den stabilisierten Zustand der Pulverförderung für den neu zugeführten Zusatzwerkstoff erreicht wurde.

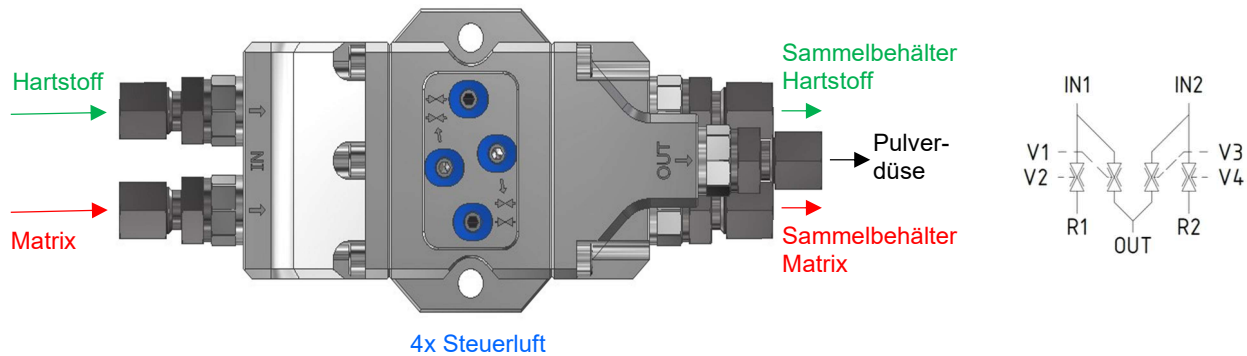


Bild 2. Schematischer Aufbau der Umschaltereinheit GTV Powder Quick Switch.

Tabelle 1. Eigenschaften und angewendete Pulverfördererratenbereiche der in Umschaltzeitanalysen verwendeten Pulver.

Pulvertyp	AISI430L	TiC/FeCr 70/30	W ₂ C/WC
d ₁₀ [µm]*	20,0	21,8	30,2
d ₅₀ [µm]*	31,4	34,1	39,9
d ₉₀ [µm]*	44,4	48,1	52,0
Schüttdichte [g/cm ³]	4,2	1,7	9,3
Pulverfördererrate [g/min]	20 - 60	10 - 30	20 - 60

* ermittelt mittels dynamischer Bildanalyse (ISO 13322-2) mit Retsch Camsizer X2

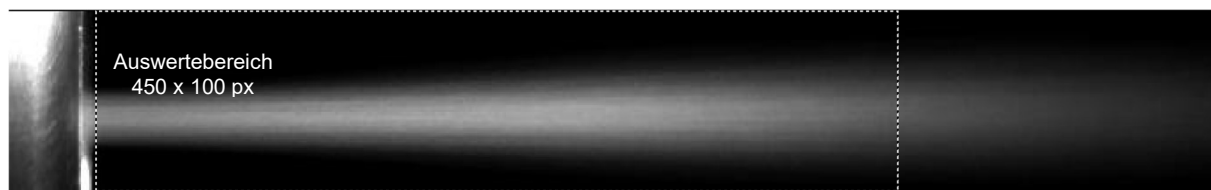


Bild 3. Schematische Darstellung der Pulverstrahlanalyse zum Ermitteln erforderlicher Umschaltzeiten.

3 Ergebnisse

3.1 Analysen zum Füllgrad von Fördertellernuten

Der zeitliche Verlauf des nicht gefüllten Nutquerschnitts in Abhängigkeit von der Tellerdrehzahl ist in **Bild 4** für das Fördern von inertgasverdüstetem AISI316L-Pulver in der Körnung +53 -150 µm dargestellt. Mit zunehmender Tellerdrehzahl steigt der nicht mit Pulver gefüllte Nutquerschnitt im Mittel kontinuierlich an. Für eine Tellerdrehzahl von 10 U/min wird mit ca. 1,5 mm² im Vergleich zu einer Tellerdrehzahl von 1 U/min (ca. 0,8 mm²) ein nahezu doppelt so hoher Wert gemessen.

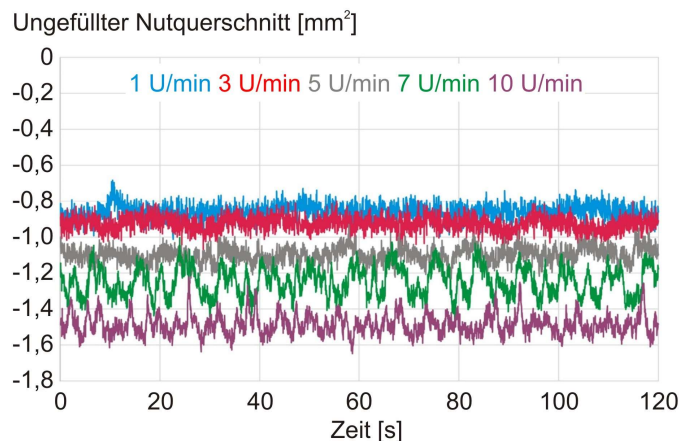


Bild 4. Zeitlicher Verlauf des nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitts beim Fördern von AISI316L-Pulver in der nominalen Körnung +53 -150 µm für Tellerdrehzahlen zwischen 1 - 10 U/min.

Während die Schwankungsbreite der Messwerte für geringe Tellerdrehzahlen von 1 - 3 U/min vergleichsweise gering ausfällt, fluktuiert der nicht gefüllte Nutquerschnitt bei 7 U/min zwischen 1,0 - 1,4 mm². Bei nochmals höherer Tellerdrehzahl von 10 U/min nehmen die Fluktuationen wieder ab. Insbesondere die Messkurven für hohe Tellerdrehzahlen legen eine an die Tellerrotation gekoppelte Periodizität der Nutfüllung nahe. Überlagerte Effekte lassen diese aber nicht eindeutig hervortreten.

Auch beim Fördern von AISI316L-Pulver in der feineren Fraktion +20 -53 µm wird für hohe Tellerdrehzahlen eine Zunahme des nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitts beobachtet (**Bild 5**). Allerdings ist der Effekt weniger stark ausgeprägt als beim Fördern der größeren Pulverfraktion. Auch die Schwankungsbreiten der Messwerte fallen geringer als beim Fördern der gröberen Pulverfraktion aus und eine an die Tellerrotation gekoppelte Periodizität der Nutfüllung lässt sich nicht erkennen. Das Aktivieren eines im Pulvertopf installierten Rührers nimmt zumindest für das AISI316L-Pulver in der Körnung +20 -53 µm keinen erkennbaren Einfluss auf die mittlere Nutfüllung oder die Schwankungsbreite der Messwerte.

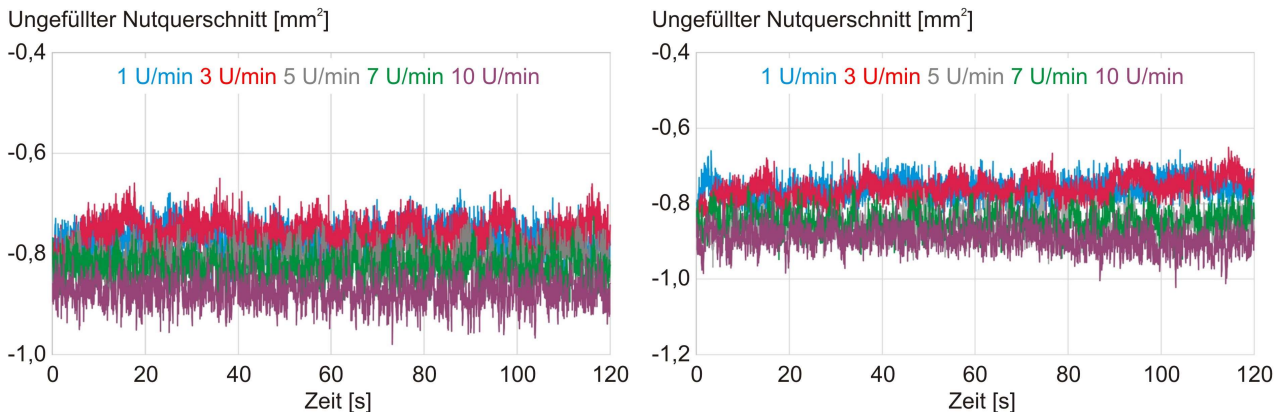


Bild 5. Zeitlicher Verlauf des nicht mit Pulver gefüllten Nutquerschnitts beim Fördern von AISI316L-Pulver in der nominalen Körnung +20 -53 µm mit Tellerdrehzahlen zwischen 1 - 10 U/min mit (links) und ohne (rechts) Aktivierung des im Pulvertopf installierten Rührers.

In Fördertests mit AISI316L-Pulver der Körnung +20 -53 µm bei einer konstanter Tellerdrehzahl von 10 U/min über einen Zeitraum von einer Stunde werden für das Anwenden einer Rotationsgeschwindigkeit von 82,5 U/min (75% des Maximalwerts) des Rührers Schwankungen der Pulverförderate von 13,8 - 15,4 g/min aufgezeichnet. Ohne Einsatz des Rührers beträgt die Schwankungsbreite 11,3 - 15,7 g/min. In diesem Regelungsmodus wird eine klare Korrelation zwischen Nutfüllungsgrad und Pulverförderate beobachtet (**Bild 6**). Sowohl kontinuierliche Drifts als auch sprunghafte Veränderungen fallen zeitlich zusammen. Dabei liegt zwischen den erfassten Ereignissen im Verlauf des Nutfüllungsgrads und der durch das Fördern auf eine Wägeeinheit ermittelten Pulverförderate ein zeitlicher Versatz, der sich aus den Zeiten, die das Pulver in der Tellerlut von der Messebene des Lasertriangulationssensors zum Absauger transportiert wird, und der Zeit, die das Pulver im Förderschlauch auf dem Weg in den Behälter auf der Wägeeinheit verbringt, zusammensetzen. Auch im Regelungsmodus einer closed-loop geregelten Pulverförderate lässt sich eine Korrelation von Nutfüllungsgrad und Pulverförderate erkennen (**Bild 6**). Aufgrund der automatischen Anpassung der Tellerdrehzahl wird zunächst eine Reaktion im Kurvenverlauf der Tellerdrehzahl zur Kompensation von Veränderungen des Nutfüllungsgrads beobachtet. Sind die Kompensationsmöglichkeiten aufgrund des Erreichens der maximalen Tellerdrehzahl erschöpft, bilden sich weitere Veränderungen des Füllgrads der Nut im Verlauf der Pulverförderate ab.

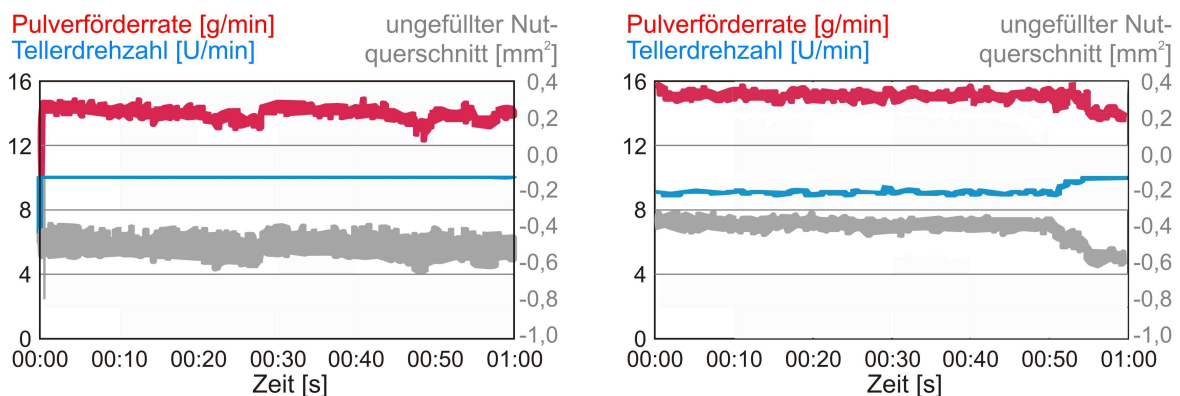


Bild 6. Gegenüberstellung von Nutfüllungsgrad und Pulverförderate beim Fördern von Pulver im Regelmodus einer konstanten Tellerdrehzahl von 10 U/min (links) sowie bei closed-loop Regelung der Pulverförderate auf einen Sollwert von 15 g/min (rechts).

3.2 Analysen zur Pulverstrahlstabilisierung bei Pulverumschaltvorgängen

Beleuchtete Pulverstrahlen weisen eine vom Pulverwerkstoff und dessen Pulverförderrate abhängige mittlere Helligkeit auf. Bei Aktivierung eines Umschaltprozesses sinkt die Messkurve zunächst kurzzeitig stark ab, weil im Förderstrang hinter der Pulverumschaltseinheit zunächst das verbliebene Pulver keine Beschleunigung durch Trägergas mehr erfährt (**Bild 7**). Danach bewirkt der Trägergasstrom aus der aktivierten Pulverlinie ein rasches Austreiben der Pulverreste, was eine stark erhöhte Helligkeit bewirkt, bevor eine Phase sehr geringer Helligkeitswerte einsetzt. In dieser Phase werden nur sehr wenige Partikel des zweiten Pulverwerkstoffs im Trägergasstrom aus der Pulverdüse ausgetragen. Vielmehr füllt der größte Teil der Pulverpartikel zunächst den Totraum im geschlossenen Strang zum Sammelbehälter. Nach dem Auffüllen des Totraums strömen die folgenden Pulverpartikel in den Strang zur Pulverdüse. Dabei kann zunächst ein Überspringen erfolgen (**Bild 7**, links), so dass kurzzeitig höhere Pulverförderraten als im stabilisierten Zustand realisiert werden, oder die Pulverförderrate steigt kontinuierlich auf den Wert des stabilisierten Zustands an (**Bild 7**, rechts).

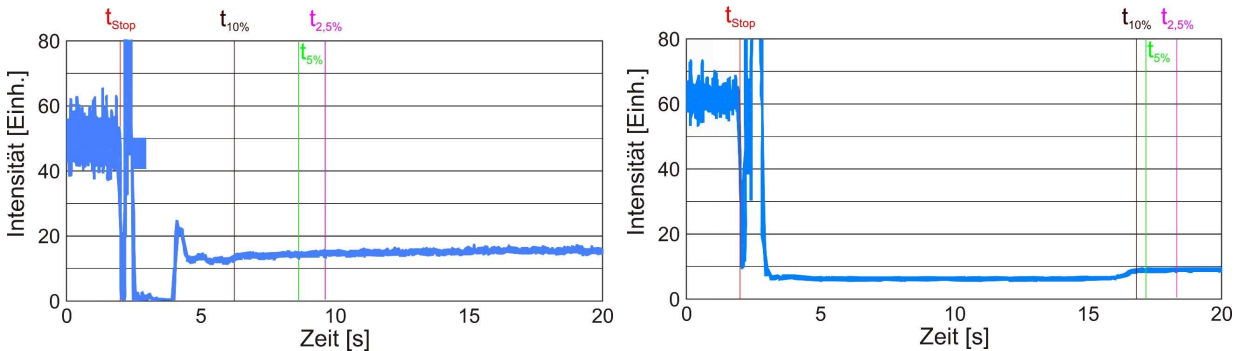


Bild 7. Helligkeitsverlauf beleuchteter Pulverstrahlen für das Umschalten von 60 g/min AISI430L auf 20 g/min TiC/FeCr 70/30 (links; $t_{10\%}$ 4,3 s, $t_{5\%}$ 6,7 s, $t_{2,5\%}$ 7,7 s) und für das Umschalten von 60 g/min AISI430L auf 20 g/min W₂C/WC (rechts; $t_{10\%}$ 14,8 s, $t_{5\%}$ 15,2 s, $t_{2,5\%}$ 16,3 s)

Das Stabilisierungsverhalten nach Umschaltvorgängen charakterisiert durch die Zeiten, nach denen keine Abweichungen von mehr als 2,5%, 5% bzw. 10% vom vollstabilisierten Zustand mehr auftreten, gestaltet sich für die verschiedenen Zusatzwerkstoffe und Pulverförderraten uneinheitlich, wobei grundsätzlich ein klarer Trend zu mit steigender Pulverförderrate sinkenden Umschaltzeiten zu beobachten ist (**Bild 8**).

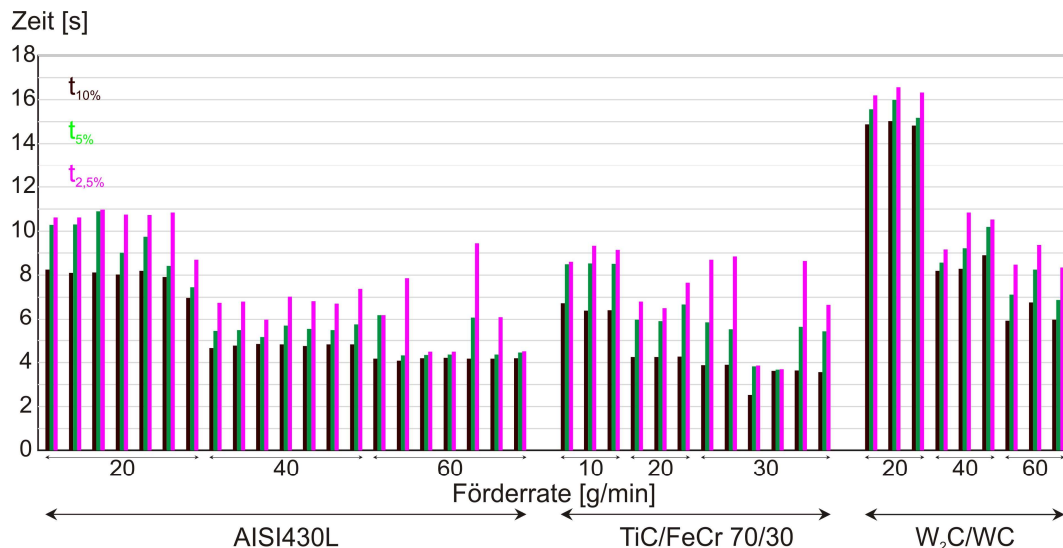


Bild 8. Ermittelte Umschaltzeiten in Abhängigkeit von Typ und Förderrate des zweiten Pulvers

Die $t_{10\%}$ -Zeiten weisen für einen Zusatzwerkstoff und eine Pulverförderrate nur relativ geringe Unterschiede auf. Während für das Fördern von AISI430L mit einer Förderrate von 20 g/min $t_{10\%}$ von ca. 8 s ermittelt werden, beträgt $t_{10\%}$ für Förderraten von 40 g/min knapp unter 5 s und für 60 g/min knapp über 4 s. Insbesondere für 60 g/min Förderrate streuen die ermittelten $t_{2,5\%}$ -Zeiten dagegen zwischen 5 - 10 s. Auch für das Fördern von TiC/FeCr 70/30 werden für eine Förderrate von 10 g/min mit ca. 6,5 s längere $t_{10\%}$ -Zeiten als für 20 g/min mit knapp über 4 s und für 30 g/min mit knapp unter 4 s ermittelt. Die $t_{2,5\%}$ -Zeiten weisen für 10 - 20 g/min Förder-rate jeweils nur geringe Abweichungen auf, während für eine Förderrate von 30 g/min Werte zwischen 3,7 - 8,9 s ermittelt werden. Für das Fördern von W₂C/WC-Pulver werden insbesondere für die geringsten

angewendeten Förderraten von 20 g/min die längsten Umschaltzeiten mit $t_{10\%}$ von knapp 15 s ermittelt. Bei 60 g/min Förderrate sinkt $t_{10\%}$ auf ca. 6 s und die Schwankungsbreite der $t_{2,5\%}$ -Zeiten liegt bei 8,4 - 9,4 s.

4 Diskussion

Lasertriangulationssensoren ermöglichen das Erfassen des Füllgrads der Fördertellernuten von Scheibenförderern mit hoher zeitlicher Auflösung. Der Nutfüllungsgrad korreliert eindeutig mit der Pulverförderrate. Da er mit einem zeitlichen Vorlauf bezogen auf das Austreten des Pulverstrahls aus der Pulverdüse ermittelt wird, ergeben sich Möglichkeiten die Daten für eine besonders effektive Regelung der in laserbasierte additive Fertigungsprozesse eingehenden Pulverförderrate zu nutzen.

Analysen der Schwankungsbreiten des Nutfüllungsgrads in Abhängigkeit vom verwendeten Hardware-Setup des Scheibenförderers (Tellertyp, Typen von Abstreifern und Absaugern, Rührertyp und -positionierung) und den Betriebsparametern (Trägergasart und dessen Massenflussrate, Tellerdrehzahl und Rotationsgeschwindigkeit des Rührers) ermöglichen die Identifikation geeigneter Parameter für das robuste Fördern eines bestimmten Pulvertyps mit einer gewünschten Pulverförderrate. In den durchgeführten Untersuchungen wird für AISI316L-Pulver in der Körnung +53 -150 μm eine ausgeprägte Abhängigkeit des Nutfüllungsgrads von der Rotationsgeschwindigkeit des Fördertellers festgestellt, was darauf hinweist, dass kein streng proportionaler Zusammenhang zwischen Tellerdrehzahl und Pulverförderrate vorliegt. Zudem erweist sich eine Tellerdrehzahl von 7 U/min für den verwendeten Hardware-Setup als besonders ungünstig. Fluktuationen des nicht gefüllten Nutquerschnitt zwischen 1,0 - 1,4 mm^2 bedeuten bezogen auf den nominellen Nutquerschnitt von 3,0 mm^2 Schwankungen des Füllgrads zwischen 53% - 67%. Derartig große Schwankungsbreiten werden für das Fördern von AISI316L-Pulver in der Körnung +20 -53 μm nicht beobachtet.

Die Stabilisierung von aus Düsen austretenden Pulverstrahlen nach dem Umschalten zwischen zwei Förderlinien unter Einsatz der Umschalteinheit GTV PQS hängt sowohl vom Typ des geförderten Pulvers als auch von der gewählten Pulverförderrate ab. Grundsätzlich sinken die Stabilisierungszeiten mit zunehmender Pulverförderrate, weil das Füllen von Toträumen rascher erfolgt. Für gleiche Pulverförderraten in g/min sinken die Stabilisierungszeiten mit der Schüttdichte des geförderten Pulvers, weil ein definiertes Volumen als Totraum zu füllen ist. Im gesamten untersuchten Förderratenbereich von bis zu 60 g/min weisen die Helligkeitskurven beleuchteter $\text{W}_2\text{C}/\text{WC}$ -Pulverstrahlen einheitlich einen kontinuierlichen Anstieg ohne Überspringen nach Umschaltvorgängen auf. Diese Charakteristik wird beim Fördern von AISI430L- und TiC/FeCr 70/30-Pulvern nur für die jeweils niedrigsten untersuchten Pulverförderraten von 20 g/min bzw. 10 g/min beobachtet. Für höhere Pulverförderraten erfolgt zunächst ein (teilweise doppeltes) Überspringen, bevor eine kontinuierliche Annäherung an den vollstabilisierten Zustand eintritt. Dies deutet darauf hin, dass mit zunehmender volumetrischer Pulverförderrate eine zunehmende Sensitivität in Bezug auf den Aufbau konstanter Druckverhältnisse in der Pulverförderlinie entsteht. Während für das Umschalten zwischen AISI430L- und TiC/FeCr 70/30-Pulverströmen Totzeiten von maximal 5 s erreichbar sind, kann das Umschalten auf $\text{W}_2\text{C}/\text{WC}$ je nach angestrebtem Hartstoffgehalt auch Totzeiten von mehr als 15 s erfordern.

Neben langlebigen Pulverumschalteinheiten sowie Monitoring- und Regelwerkzeugen zum Erzielen stabiler Pulverströme und zum Erkennen von Abweichungen von einem optimalen Prozesszustand werden aktuell weitere Entwicklungen betrieben, um die Grundlagen für eine Massenfertigung beschichteter Bremscheiben mittels Laser-Pulver-Auftragschweißens zu legen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf Aspekten des Pulverhandlings. So entspricht es zumeist dem Stand der Technik Pulverfördertöpfe mit Pulver aus Plastikflaschen zu befüllen, wodurch ein extremes Aufkommen an kontaminiertem Plastikmüll resultieren würde. Zudem sind die Anlagenbediener beim Befüllen gegebenenfalls Stäuben ausgesetzt. Abhilfe können bereits in der Fertigung beschichteter Lambdasensoren [7] erprobte Technologien für ein automatisches Befüllen von Pulvertöpfen schaffen. Dabei gelangt Pulver aus großen Gebinden mittels Vakuumpföderung zu Vorratsbehältern, die über den Pulvertöpfen angebracht sind. Nicht in Betrieb befindliche Pulvertöpfe, die über einen mittels Quetschventil verschlossenen Aufsatz verfügen, werden im drucklosen Zustand durch Öffnen des vorgenannten Quetschventils und Aktivierung eines Dosierventils am Ausgang des Vorratsbehälters definiert befüllt. Nach dem Befüllen schließt das Quetschventil erneut und ermöglicht die erforderliche Druckbeaufschlagung für das erneute Austragen definierter Pulvermengen in einem definierten Trägergasstrom. Umschalteinheiten wie der untersuchte GTV PQS ermöglichen das sortenreine Sammeln von Pulver, das nicht mit dem Laserstrahl in Wechselwirkung getreten ist, in Auffangbehältern, aus denen Pulver wiederum mittels Vakuumpföderung Vorratsbehältern zugeführt werden kann.

Schließlich erfolgen aufbauend auf der Erkenntnis, dass die Einbrandgeometrie durch Kontrolle der lokalen Partikeldichte in mit dem Laserstrahl wechselwirkenden Pulverströmen gezielt beeinflusst werden kann [5,8], weitere Prozessentwicklungen mit dem Ziel eine optimale Kontrolle über den Laser Cladding Prozess zu gewinnen. Während Pulverförderstrecken nur sehr träge Anpassungen des Prozesszustands erlauben, kann die Leistung von Laserstrahlen sehr rasch angepasst werden. Dementsprechend sieht ein vielversprechender Ansatz das direkte Überlagern jedes einzelnen, aus einer Düse mit quasi-koaxialer Pulverzufuhr austretenden Pulverstrahls mit einem eigenen, regelbaren Laserstrahl vor (**Bild 9**). Dabei kann nach Bedarf über einen zentral angeordneten Laserstrahl noch zusätzliche Energie zugeführt werden. Dieser Ansatz ermöglicht beispielsweise eine Anpassung der lokalen Energiezufuhr beim Beschichten an Kanten. Auch der Aufbau

komplexer Geometrien mittels LB-DED kann mit diesem Ansatz besonders effektiv verfolgt werden, weil auf lokal unterschiedliche Wärmeabfuhrbedingungen flexibel und rasch reagiert werden kann.

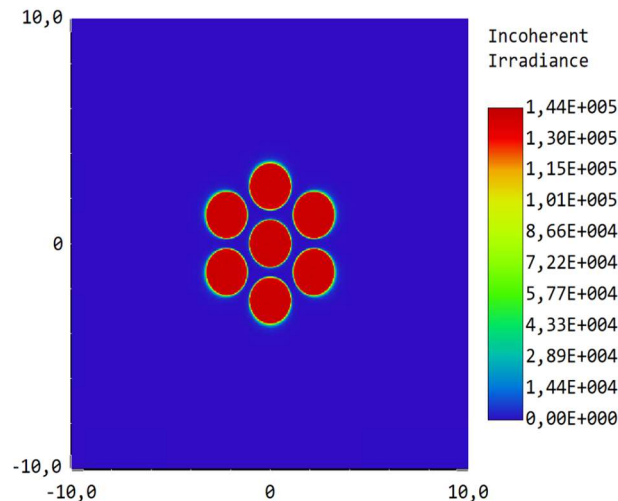


Bild 9. Berechnete Intensitätsverteilung im Fokuspunkt für sieben Laserstrahlen (hier mit gleicher Leistung), wobei die äußeren sechs Strahlen jeweils mit einem aus einer quasi-koaxialen 6-Strahl-Pulverdüse austretenden Pulverstrom überlagert werden.

4 Zusammenfassung

Der Füllungsgrad von Tellernuten in Scheibenförderern, der mit der Pulverfördertrate korreliert, kann mittels Lasertriangulation verlässlich erfasst werden. Aufgrund des zeitlichen Vorlaufs der Messungen vor dem Austragen des Pulverstroms aus einer Düse ergibt sich die Möglichkeit einer proaktiven Regelung der Pulverfördertrate durch Anpassen der Tellerdrehzahl. Zudem erlauben Analysen der Schwankungsbreiten des Nutfüllungsgrads das Ermitteln optimaler Setups für das robuste Fördern spezifischer Pulver mit einer gewünschten Förderrate. Pulverumschalteneinheiten erlauben den Wechsel von geförderten Beschichtungswerkstoffen mit definierten Förderraten. Die erforderlichen Totzeiten zum Erzielen eines stabilen, definierten Pulverstroms hängen von der Schüttdichte und der Förderrate des Pulvers, auf das umgeschaltet wird, ab. Aktuelle Entwicklungen mit Bezug auf die Pulverzufuhr in der laserbasierten additiven Fertigung zielen auf das automatische Befüllen von Pulverfördertröpfen und das sortenreine Sammeln von Pulvern, die nicht mit dem Laserstrahl in Wechselwirkung treten. Für eine optimale Kontrolle von laserbasierten additiven Fertigungsprozessen werden aus quasi-koaxialen Düsen austretende Pulverströme mit separat geregelten Laserstrahlen überlagert.

Schrifttum

- [1] Königstein, T., C. Schmengler, A. Wank, M. Mülln: Influencing and disturbing variables in relation to the feed stabilities of powder feed systems with different control concepts - Einfluss- und Störgrößen mit Bezug auf die Förderstabilität bei Pulverfördersystemen mit unterschiedlichen Regelungskonzepten. Thermal Spray Bulletin, Vol. 14, 2021, No. 2, pp. 82-86
- [2] N.N.: Code of practice DVS 2322: Determination of powder feed rate, 09/2017, pp. 1-11
- [3] 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
- [4] 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, pp. 443-455
- [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] 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 Bremsscheiben. Tagungsband 8. GTV Kolloquium Thermisches Spritzen & Laser Cladding, 02. September 2022, Luckenbach, D, S. 99-111
- [7] Königstein, T.: Erfolgreiche Realisierung Hochautomatisierter Anlagenkonzepte zum Spritzen und Laser Cladding. Tagungsband 12. Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, 26.-27. Oktober 2023, Erding, D, S. 123-130
- [8] Wank, A.: Tailoring of workpiece geometry and coating microstructure in laser cladding processes. Presentation at the EMPORIA conference, May 16th - 17th, 2023, Aachen, D, slide no. 18, https://www.gtv-mbh.de/_Resources/Persistent/9/7/8/3/9783df4f6f8e847f97d5f1af34618ec02c2b5758/Emporia%202023%20GTV.pdf