



Fraunhofer
ILT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR LASERTECHNIK ILT

Thomas Schopphoven

Experimentelle und modelltheoretische Untersuchungen zum Extremen Hoch- geschwindigkeits-Laserauftragschweißen

FRAUNHOFER VERLAG

Experimentelle und modelltheoretische Untersuchungen zum
Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen

Experimental and Model-theoretical Investigations on
Extreme High-speed Laser Material Deposition

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Thomas Schopphoven

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2019

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Fraunhofer-Institut für
Lasertechnik ILT

Experimentelle und modelltheoretische
Untersuchungen zum Extremen Hoch-
geschwindigkeits-Laserauftragschweißen

von Thomas Schopphoven

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für
Lasertechnik ILT
Telefon 02 41 89 06-0
Telefax 02 41 89 06-121
E-Mail info@ilt.fraunhofer.de
URL www.ilt.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-8396-1587-4

D 82 (Diss., RWTH Aachen University, 2019)

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2020

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in der Gruppe Laserauftragschweißen des Kompetenzfeldes Generative Verfahren und funktionale Schichten. Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A. für die Überlassung des Themas und die intensive Betreuung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die Übernahme des Korreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Dr.-Ing. Andres Gasser, Herrn Dr. rer. nat. Konrad Wissenbach und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Johannes Henrich Schleifenbaum für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die fortwährende Unterstützung, motivierende Anregungen und für die Durchsicht des Manuskriptes. Herrn Dr. rer. nat. Norbert Pirch für die Hilfe bei den Simulationsberechnungen und die zahlreichen Diskussionen. Herrn Stefan Mann für die Unterstützung bei der Charakterisierung des Pulver-Gas-Strahls.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Kompetenzfeldes Generative Verfahren und funktionale Schichten für die konstruktive Zusammenarbeit und die stets angenehme Arbeitsatmosphäre. Im Besonderen hierbei den derzeitigen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Gruppe Laserauftragschweißen. Meinen zahlreichen Projekt-, Bachelor- und Masterarbeitern sowie studentischen Hilfskräften für ihre Beiträge zu dieser Arbeit und für die Entlastung im Labor.

Meiner Familie für die immerwährende Unterstützung und die Ermöglichung meiner Ausbildung. Nicht zuletzt von Herzen meiner geliebten Frau Mandy Sammel dafür, dass aus Alltag ein Abenteuer wird und für das Verständnis, das sie mir über all die Jahre zuteilwerden ließ.

Kurzfassung

Das Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) ist eine neue Verfahrensvariante des Laserauftragschweißens (LA) mit pulverförmigen Zusatzwerkstoffen. Bei dieser Prozessführung wird das Pulver nicht wie beim LA durch den Kontakt mit der Schmelze geschmolzen, sondern durch die Laserstrahlung bereits oberhalb der Substratoberfläche aufgeschmolzen und damit dem Schmelzbad flüssig zugeführt. Dadurch entfällt die erforderliche Zeit zum Aufschmelzen der Partikel im Schmelzbad, wodurch die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit von wenigen Metern pro Minute auf bis zu einige Hundert Meter pro Minute vergrößert werden kann. Nach aktuellem Stand der Technik existieren für die Prozessführung beim EHLA jedoch bislang keine Werkzeuge bzw. Methoden, mit denen die prozessrelevanten Einflussgrößen wie Transmissionsgrad, Partikelerwärmung im Strahlengang, Erwärmung des Substrates und Spurbildung beschrieben werden können. Demzufolge liegt bislang auch kein ausreichendes Prozessverständnis vor, um die technologischen Grenzen des EHLA-Verfahrens, z. B. hinsichtlich erreichbarer Vorschubgeschwindigkeit oder Spurbildung abschätzen zu können und durch Verschieben der Prozessgrenzen zukünftig die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens für die Produktion nachhaltig zu vergrößern. Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Erarbeitung der Grundlagen für das EHLA-Verfahren, die eine Skalierbarkeit ermöglichen und prinzipiell begrenzen. Dazu werden zunächst die Werkzeuge für das EHLA, der Pulver-Gas-Strahl und die Laserstrahlung, experimentell charakterisiert und mit einem mathematischen Modell beschrieben, dessen Annahmen aus experimentellen Beobachtungen abgeleitet werden. Damit können die physikalischen Prozesse des EHLA-Verfahrens in Abhängigkeit der Einstellungen für die Pulverförderung (Kornfraktion, Pulvermassenstrom etc.), des Arbeitsabstandes, der Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit erstmalig vollständig beschrieben werden. Auf Basis des gesteigerten Prozessverständnisses wird experimentell und modelltheoretisch gezeigt, dass die Erzeugung einer Schmelze vor dem Kontakt mit den schmelzflüssigen Partikeln keine notwendige Voraussetzung zur Herstellung metallurgisch angebundener Schichten ist. Das Substrat muss durch den transmittierten Strahlungsanteil nur so weit vorgewärmt werden, dass der zusätzliche Energieeintrag der geschmolzenen Pulverpartikel ausreichend ist, um durch die Temperaturerhöhung infolge des Wärmekontaktes selbst bei einem vorher festen, noch nicht geschmolzenen Substrat eine schmelzmetallurgische Verbindung an der Oberfläche auszubilden. Diese im Rahmen der Arbeit erstmalig beschriebene neue Prozessvariante wird als „Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserschmelzspritzen“ (MELT-X) bezeichnet. Da beim MELT-X- gegenüber dem EHLA-Verfahren bei ansonsten gleichen Voraussetzungen (Transmissionsgrad, Partikelerwärmung etc.) eine geringere Laserleistung benötigt wird, kann die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit weiter vergrößert und die bisherige Prozessgrenze beim EHLA-Verfahren überwunden werden.

Abstract

Extreme High-speed Laser Material Deposition (German acronym EHLA) is a new approach to Laser Material Deposition (German acronym: LA) with powdery additive materials. In this approach, the powdery additive material is melted above, rather than upon contact with the melt pool as with the conventional approach, and is thus supplied to the melt pool in liquid form. This eliminates the time required to melt the particles in the melt pool and allows the achievable feed rate to be increased from a few meters per minute to up to several hundred meters per minute. Up to now, however, there are no tools or methods available to describe the process-relevant factors that influence the process layout of EHLA, such as degree of transmission, particle-heating in the beam path, heating of the substrate and track formation. Consequently, there is no sufficient understanding of the process to estimate the technological limitations of the EHLA process in terms of achievable feed rate or track formation and to shift the process limits in the future to sustainably increase the application range of the process for production. The overall objective of the present work is therefore to develop the fundamentals of the EHLA process, which enable as well as principally limit the scalability of the process. First, the tools for the EHLA, the powder gas jet and the laser radiation, are characterized experimentally and described with a mathematical model. The model's assumptions are derived from experimental observations. This allows to completely describe the physical process of EHLA for the first time as a function of the settings for powder feed (grain fraction, powder mass flow, etc.), working distance, laser power, and feed rate. Based on this enhanced breakdown of the process, this study demonstrates both experimentally and model-theoretically that the formation of a melt pool prior to contact with the molten particles is not a necessary condition for the production of metallurgically bonded layers. The substrate must be preheated by the transmitted radiation only to the extent that the energy input of molten powder particles is sufficient to form a metallurgical bond on the surface, even in the case of a solid, not yet molten substrate. This new process layout is called "Extreme High-speed Laser Melt Spraying" (MELT-X). Since MELT-X requires lower laser powers than the EHLA process, the achievable feed rate can be further increased, assuming otherwise identical conditions (degree of transmission, particle heating, etc.), and existing limits to the EHLA process can be overcome.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik	4
2.1	Konventionelle Beschichtungsverfahren	4
2.2	Maschinen- und Systemtechnik für das Laserauftragschweißen	6
2.3	Prozessrelevante Einflussgrößen	8
2.4	Prozessführungsstrategien	13
2.5	Prozessgrenzen	18
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	20
4	Verwendete Maschinen- und Systemtechnik	25
4.1	Werkstoffe	25
4.2	Pulverförderung und Pulverzufuhrdüse	28
4.3	Laserstrahlquelle und Optik	32
4.4	Handhabungssystem	33
4.5	Pulver-Gas-Strahl-Charakterisierung	34
5	Charakterisierung der Werkzeuge	37
5.1	Pulverpartikelanzahl	37
5.2	Approximation der Partikelgeschwindigkeit	41
5.3	Partikelpropagationsmodell	44
5.4	Pulverpartikeldichtevertellung	46
5.5	Laserleistungsdichtevertellung	52
6	Strahl-Stoff-Wechselwirkung	53
6.1	Transmissionsgrad	53
6.2	Partikeltemperaturverteilung	58
6.3	Substrattemperaturverteilung	65
6.4	Wärmeaustausch der Partikel mit der Substratoberfläche	70
6.5	Zwischenfazit	75
7	Abschätzung Prozessgrenzen und Verifikation	78
7.1	Abschätzung der Prozessgrenzen	78
7.2	Ermittlung eines Prozessfensters	80
7.3	Verifikation eines Prozessfensters	88
8	Zusammenfassung und Ausblick	92

9	Anhang	95
9.1	Quellenangaben und weiterführende Literatur	95
9.2	Symbolverzeichnis	103
9.3	Abkürzungsverzeichnis	105

1 Einleitung

Die Wirtschaftsleistung der Bundesrepublik Deutschland ist wie die keiner anderen westlichen Industrienation auf die Produktion von Gütern ausgerichtet [1]. Im Jahr 2017 waren etwa 8,2 Mio. [2] bzw. 18,5 % [3] der Erwerbstätigen im produzierenden Gewerbe (ohne Baugewerbe) beschäftigt und erwirtschafteten ca. 772,5 Mrd. € bzw. 26,1 % der gesamten Bruttowertschöpfung [4]. Das produzierende Gewerbe nimmt damit eine Schlüsselrolle in der deutschen Volkswirtschaft ein und trägt aufgrund der erheblichen Bedeutung für die Wertschöpfung und Beschäftigung auch weiterer Wirtschaftsbereiche maßgeblich zur Sicherung des Wohlstandes bei [4],[5]. Dabei ist die Herstellung von Bauteilen und Produkten untrennbar mit der Notwendigkeit eines Einsatzes von Ressourcen verbunden: Der Anteil am Gesamtumsatz für Materialaufwendungen beträgt im produzierenden Gewerbe durchschnittlich 55,4 % (2016) [6]. Von globalen Entwicklungen wie der steigenden Nachfrage nach Ressourcen sowie den mit der Ressourcennutzung einhergehenden umwelt- und klimabezogenen Problemlagen ist der Produktionssektor somit unmittelbar betroffen [7]. Infolgedessen wird die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen zunehmend durch die Effizienz bestimmt, mit der Rohstoffe und Energie zur Wertschöpfung genutzt werden können. Während die Bruttowertschöpfung im produzierenden Gewerbe in den vergangenen 10 Jahren mit jährlichen Zuwachsraten um durchschnittlich 3 % gemäß des nationalen Wirtschaftswachstums zunahm, blieb dessen Anteil an der Wertschöpfung im selben Zeitraum sowie die Anzahl der Erwerbstätigen trotz Zunahme der Gesamtbeschäftigung nahezu unverändert [3],[4]. Prognosen zufolge wird sich dieser relative Abwärtstrend der Beschäftigungsentwicklung im produzierenden Gewerbe zukünftig weiter fortsetzen [5]. Bei einem Anteil für Personalaufwendungen in Höhe von durchschnittlich etwa 19 % (2016) [6] werden inländische Produktionsunternehmen zudem immer stärker durch die im relativen Vergleich niedrigeren Produktionskosten infolge geringerer Lohnkosten in Niedriglohnländern unter Druck gesetzt. Um unter diesen Rahmenbedingungen einer Verlagerung der Produktionsstätten und Wertschöpfungsanteile ins Ausland entgegenzuwirken, sind produzierende Unternehmen herausgefordert, Produktionstechniken konsequent und kontinuierlich weiterzuentwickeln und den technologischen Vorsprung zu sichern [5].

Oberflächentechnologien zur Erzeugung funktionaler Oberflächen können hierbei entscheidende Lösungsansätze liefern: In der Forschungsagenda Oberfläche ermittelte die Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e. V. einen Wertschöpfungsbeitrag der Oberflächentechnik an den Produktkosten von bislang lediglich ca. 3 bis 7 %. Eine Steigerung des Wertschöpfungsbeitrags um 5 % könnte hierbei einen Kostenvorteil von bis zu 20 % in Niedriglohnländern

kompensieren [9]. Durch innovative Beschichtungsverfahren, die neue Bauteilfunktionalitäten ermöglichen, sowie technologische Fortschritte bzgl. der Energie- und Ressourceneffizienz bei den Beschichtungsprozessen selbst können künftig der Nutzen für Anwender und Verbraucher und dadurch die Wertschöpfung der Produkte weiter gesteigert werden [8]. Ein weiterer Aspekt von volkswirtschaftlicher Bedeutung ist der Einsatz funktionaler Oberflächen zur Vermeidung von Bauteilschäden bzw. frühzeitigen Ausfällen: Der durch Verschleiß und Korrosion verursachte volkswirtschaftliche Schaden wird in Industrieländern auf mehrere Prozent des Bruttosozialproduktes geschätzt [10]. Bezogen auf die Bundesrepublik Deutschland entstehen somit hinsichtlich notwendiger Instandsetzungsmaßnahmen und Produktionsausfälle jährliche Kosten im dreistelligen Milliarden-Euro-Bereich, wobei nahezu sämtliche Industriezweige und Wirtschaftsbereiche betroffen sind [8]. Durch die Vergrößerung der Bauteillebensdauer mit entsprechenden Schutzschichten können sowohl die Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus maßgeblich gesteigert als auch immense Kosteneinsparpotenziale erschlossen werden [7]. Weiterhin können Schutzschichten einen wesentlichen Beitrag zur Schonung von Mensch und Natur leisten, wie bspw. durch die Reduktion von Feinstaubemissionen infolge des Reibverschleißes von PKW-Bremsscheiben [11]–[14].

Bei der Herstellung verschleiß- und korrosionsbeständiger Beschichtungen sind dünne metallische Schutzschichten mit Schichtdicken im Bereich von 10 bis 250 µm, die mit galvanotechnischen oder thermischen Spritzverfahren aufgetragen werden, Stand der Technik [15],[16]. Diese Verfahren weisen jedoch entscheidende umwelttechnische (Einsatz umweltschädlicher Chemikalien, Schallemissionen, hoher Brennstoff und Materialverbrauch usw.) sowie technologische (geringe Schichthaftung, begrenzte Korrosionsbeständigkeit, Schichtdefekte, usw.) Defizite auf, die den Einsatzbereich deutlich beschränken [17]–[25].

Mit Laserauftragschweißen (LA) können dichte, schmelzmetallurgisch angebundene und damit gut haftende Beschichtungen aus einer Vielzahl metallischer Legierungen unter vollständigem Verzicht auf umweltschädliche Chemikalien oder Schallemissionen hergestellt werden. Beim LA wird durch Laserstrahlung ein Schmelzbad auf der Oberfläche des Substrates erzeugt. Gleichzeitig wird ein Zusatzwerkstoff in das Schmelzbad geführt und dort vollständig aufgeschmolzen. Durch die exakte räumliche und zeitliche Steuerbarkeit des Wärmeeintrags durch Laserstrahlung in Verbindung mit einem definierten Materialauftrag können mit dem LA Beschichtungen hergestellt werden, mit denen die gewünschten Schichteigenschaften, wie z. B. Korrosionsbeständigkeit, bereits mit einlagigen Schichten, ohne thermische Nachbehandlung, exakt eingestellt werden können [26]–[29]. Trotz dieser verfahrenstechnischen Vorteile gegenüber der Galvanotechnik und dem thermischen Spritzen konnte sich das LA im Bereich des Verschleiß- und Korrosionsschutzes bislang nur in vereinzelten Applikationen etablieren, wie z. B. den Verschleißschutz von Messern für die Landwirtschaft [30]. Wirtschaftliche

Flächenraten (beschichtete Fläche pro Zeit: Produkt aus Vorschubgeschwindigkeit und Spurversatz) können beim LA bislang nur durch flächige, bis zu 20 mm breite Spuren und den Einsatz leistungsstarker Laserstrahlquellen mit Ausgangsleistungen von bis zu 20 kW bei verhältnismäßig geringen Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von 0,5 bis 2 m/min erreicht werden [31],[32]. Wesentliche Defizite bei der bisherigen Prozessführung sind der große Energieeintrag und die daraus u. U. resultierenden unerwünschten Gefügeveränderungen im Grundwerkstoff sowie die geringe Maßhaltigkeit infolge von Verzug. Ferner sind damit erreichbare Schichtdicken mit 0,5 bis 2 mm in Bezug auf Materialeinsatz und Nachbearbeitungsaufwand gegenüber geforderten Schichtdicken von 10 bis 250 μm deutlich zu groß.

Auf Basis der dargestellten Randbedingungen besteht bei einer Vielzahl von Dienstleistern und Endanwendern ein großer Bedarf dünne Metallschichten ökologischer und ressourceneffizienter aufzutragen. Auch die Fragen nach der Verarbeitbarkeit von innovativen Beschichtungsmaterialien rücken aufgrund der Abhängigkeit von bestimmten Rohstoffen wie bspw. seltenen Erden oder teuren Legierungselementen zunehmend in den Fokus der Branche. Ein neuer Ansatz für das LA mit pulverförmigen Zusatzwerkstoffen – das Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) – bietet das große Potenzial diesen sowohl technologischen als auch ökologischen und ökonomischen Herausforderungen gleichermaßen zu begegnen [33]–[36]. Beim EHLA wird der pulverförmige Zusatzwerkstoff, anders als beim LA, bereits gezielt oberhalb des Schmelzbades auf der Substratoberfläche durch die Wechselwirkung mit der Laserstrahlung aufgeschmolzen und dem Schmelzbad in demselben Aggregatzustand, d. h. flüssig, zugeführt. Dadurch entfällt die erforderliche Zeit zum Aufschmelzen der Partikel im Schmelzbad, wodurch die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit von wenigen Metern pro Minute auf bis zu einige Hundert Meter pro Minute vergrößert werden können soll. [36].

Nach aktuellem Stand der Technik existieren für die Prozessführung beim EHLA jedoch bislang keine Werkzeuge bzw. Methoden, mit denen die prozessrelevanten Einflussgrößen wie Transmissionsgrad der Laserstrahlung durch den Pulver-Gas-Strahl, Partikelerwärmung im Strahlengang, Erwärmung des Substrates und Spurbildung beschrieben werden können. Demzufolge liegt bislang auch kein ausreichendes Prozessverständnis vor, um die technologischen Grenzen des EHLA-Verfahrens z. B. hinsichtlich erreichbarer Vorschubgeschwindigkeit oder der Spurbildung abschätzen zu können und durch Verschieben der Prozessgrenzen zukünftig die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens für die Produktion – insbesondere in der Oberflächentechnik, aber auch bei der Reparatur und der additiven Fertigung – nachhaltig zu vergrößern.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Konventionelle Beschichtungsverfahren

Zur Herstellung verschleiß- und korrosionsbeständiger Beschichtungen werden überwiegend dünne metallische Schutzschichten mit Schichtdicken im Bereich von 10 bis 250 µm mit galvanotechnischen oder thermischen Spritzverfahren aufgetragen. Galvanotechnische und thermische Spritzverfahren weisen jedoch entscheidende umwelttechnische sowie technologische Defizite auf, die den Einsatzbereich deutlich beschränken. Die beiden am häufigsten eingesetzten Verfahren sind das Hartverchromen mit Schichtdicken im Bereich von 5 bis 250 µm und das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (High-Velocity-Oxygen-Fuel, HVOF) mit Schichtdicken von 100 bis 500 µm [16].

Hartverchromen

Beim Hartverchromen wird Chrom in einem elektrochemischen Bad bei Prozess-temperaturen im Bereich von 55 °C aus einer Chromsäurelösung auf Basis von Chrom (VI) flächig auf einem Werkstück abgeschieden [15]. Die entstehende Hartchromschicht ist nicht schmelzmetallurgisch mit dem Grundwerkstoff verbunden und weist Mikrorisse im Gefüge auf, wodurch die Korrosionsbeständigkeit begrenzt wird. Da der Auftrag flächig ist, können selektive Beschichtungen nur durch ein aufwändiges Maskierungsverfahren aufgebracht werden. Darüber hinaus spielt die Vorbehandlung durch verschiedene Reinigungsschritte wie z. B. Beizen oder Dekapieren sowie die Geometrie der Bauteile eine zentrale Rolle für die Qualität der Beschichtung. Die Umsetzung immer neuer Auflagen in den Bereichen des Umweltschutzes, insbes. EC 1907/2006 (Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals, REACH-Verordnung), der CO₂-Reduzierung und der Energieeffizienz, z. B. 1999/13/EC, 2011/65/EU, 2012/19/EU, führt zu erheblichen finanziellen Mehrbelastungen bei den Unternehmen [18]. Eine besondere Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang die Aufnahme von Chromelektrolyten auf Basis von Chrom (VI) in den Annex XIV der REACH-Verordnung als besonders besorgniserregende Substanz (Substances of Very High Concern, SVHC) dar [17]. Die Folge ist, dass diese Chromelektrolyte aufgrund der mutagenen und kanzerogenen Wirkung seit September 2017 nur noch nach einer Autorisierung verwendet werden dürfen. Anträge auf Zulassung müssen bei der europäischen Chemikalien-Agentur (European Chemicals Agency, ECHA) gestellt werden. Darin ist für jede Anwendung nachzuweisen, dass der Stoff sicher gehandhabt wird und keine Alternativsubstanz zur Verfügung steht, bzw. es ist eine sozio-ökonomische Studie vorzulegen, aus der hervorgeht, dass der Nutzen des Verfahrens / der Beschichtung größer ist als dessen Aufwände. Ähnliches gilt für die Verwendung von Nickel in der Galvanotechnik, das von der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) als umweltschädigend und

giftig eingestuft wird [18]. Neben verschärften Umweltauflagen gelten die energieintensiven elektrochemischen Verfahren durch steigende Strompreise im Zusammenhang mit der Energiewende als zunehmend unwirtschaftlich, da der Energiekostenanteil an den Gesamtkosten in galvanotechnischen Betrieben bis zu 23 % betragen kann [18]. Weiterhin ist die Werkstoffauswahl in der Galvanotechnik beschränkt.

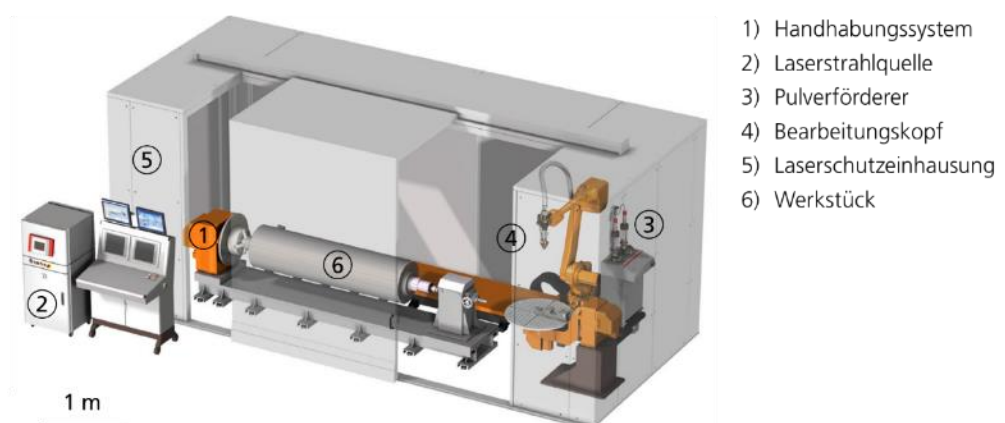
Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen

Beim HVOF wird ein Brennstoff in eine Verbrennungskammer geführt, wo dieser unter der Zugabe von Sauerstoff entzündet und verbrannt wird. Der pulverförmige Spritzwerkstoff wird axial oder radial in der Brennkammer im Bereich der Expansionsdüse zugeführt. Dadurch werden die Partikel erwärmt, teilweise geschmolzen, auf Geschwindigkeiten von 700 bis 1200 m/s beschleunigt und schließlich auf das zu beschichtende Werkstück gespritzt [16]. Die Pulverpartikel werden beim Auftreffen plastisch deformiert, sodass die Partikel durch mechanische Verklammerung am Substrat haften. Um eine ausreichende Schichthaftung zu gewährleisten, ist eine Vorbehandlung des Substrates i. d. R. durch Strahlen erforderlich. Mit dem HVOF kann eine Vielzahl von Werkstoffen bei gleichzeitig geringer thermischer Belastung des Substrates verarbeitet werden. Jedoch sind die Einsatzbereiche der Beschichtungen aufgrund der verhältnismäßig schwachen mechanischen Bindung zwischen Beschichtung und Substrat sowie einer verfahrenstypischen Porosität im Bereich von 0,1 bis 2 Vol.-% beschränkt [16]. Darüber hinaus ist der Gas- und Materialverbrauch beim HVOF groß (Gasverbrauch mehrere 100 l/min, Auftragsrate: typischerweise ca. 2–4 kg/h, je nach Material und Prozessführung bis zu 14 kg/h, Pulver-Auftragswirkungsgrad: 50–70% für konventionelle Spritzpistolen bzw. 35 bis 50% für kerosinbetriebene Prozesse [16],[19],[25]) und Reparaturprozesse aufgrund der erforderlichen Vorbehandlung des Substrates bei Defekten in den Schichten aufwändig. Aufgrund der Porosität müssen für korrosionsbeständige Schichten Mehrlagenschichten mit Schichtdicken bis zu 500 µm aufgetragen oder dünnere Schichten aufwändig, bspw. mit Harzen auf Epoxid-, Silikon oder Sol-Gel-Basis versiegelt werden [23]. Nachteile konventioneller Versiegelungstechniken sind die unzureichende Reproduzierbarkeit des Applikationsprozesses, die unzureichende Tiefenwirksamkeit, die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften sowie unbekanntes Langzeitverhalten [23]. Thermische Spritzverfahren stehen darüber hinaus zunehmend in der Kritik, da bei den Prozessen verfahrensabhängig große Schalldruckpegel erzeugt werden. Die Auslösewerte der Lärmvibrationsarbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) werden dabei z. T. deutlich überschritten, z. B. für das HVOF mit Spitzenwerten über 130 dB(A) [24]. Wegen der großen Schallpegel sind die Prozesse nur in dafür ausgelegten vollkommen geschlossenen, lärmabsorbierenden Spritzkabinen möglich. Je nach Qualität der Dämmung ist in der Praxis jedoch nur eine Schallminderung um bis zu 40 dB(A) möglich. Gleichzeitig müssen solche Kabinen auch Belastungen durch unzulässig hohe Werte von Staub und Strahlung (IR, UV und sichtbare Strahlung) außerhalb der Schallschutz-Spritzkabine verhindern [24].

2.2 Maschinen- und Systemtechnik für das Laserauftragschweißen

Mit LA können anders als mit galvanotechnischen oder thermischen Spritzverfahren dichte, schmelzmetallurgisch angebundene und damit gut haftende Beschichtungen aus einer Vielzahl von metallischen Legierungen mit definiertem Materialauftrag und Energieeintrag unter vollständigem Verzicht auf umweltschädliche Chemikalien oder Schallemissionen hergestellt werden. Die erforderlichen Systemtechnik-Komponenten für das LA mit pulverförmigen Zusatzwerkstoffen bestehen aus einem Handhabungssystem, einer Laserstrahlquelle, einer Pulverfördereinheit, einem Bearbeitungskopf zur Laserstrahlformung und -fokussierung mit integrierter Pulverzufuhrdüse, einer lokalen Schutzgaszufuhr sowie einer Laserschutzeinhausung. In Bild 1 ist schematisch ein vollständiges System für das pulverbasierte LA dargestellt [37].

Bild 1
Schematische Darstellung eines Handhabungssystems für das Beschichten von rotationssymmetrischen Komponenten durch LA mit einem Knickarmroboter [37]



Laserstrahlquellen

Für das LA können sowohl CO₂-, Festkörper- (InnoSlab-, Scheiben-, Faser-) als auch Dioden-Laserstrahlquellen eingesetzt werden. Aufgrund deutlich größerer Absorptionsgrade entsprechender Laserstrahlung und des größeren optoelektrischen Wirkungsgrades haben sich mittlerweile fast ausschließlich Strahlquellen mit Wellenlängen im Bereich von 1 µm gegenüber CO₂-Laserstrahlquellen mit einer Wellenlänge von ca. 10 µm durchgesetzt. Zusätzlich lässt sich die Laserstrahlung mit Lichtleitfasern führen, wodurch eine größere Flexibilität bzgl. der Strahlführung gewährleistet wird [27],[29]. Für kleine, präzise Auftragschweißungen kommen aufgrund der großen Strahlqualität insbesondere Festkörper-Laserstrahlquellen zum Einsatz. Für großflächige Beschichtungen werden überwiegend Dioden-Laserstrahlquellen eingesetzt. Die zunehmende Bedeutung von Dioden-Laserstrahlquellen ist dabei nicht nur auf die gegenüber Festkörper-Laserstrahlquellen geringen Investitionskosten, sondern u. a. auch auf den großen optoelektrischen Wirkungsgrad von 35 bis 50 % und Fortschritte in Bezug auf die Strahlqualität zurückzuführen [29].

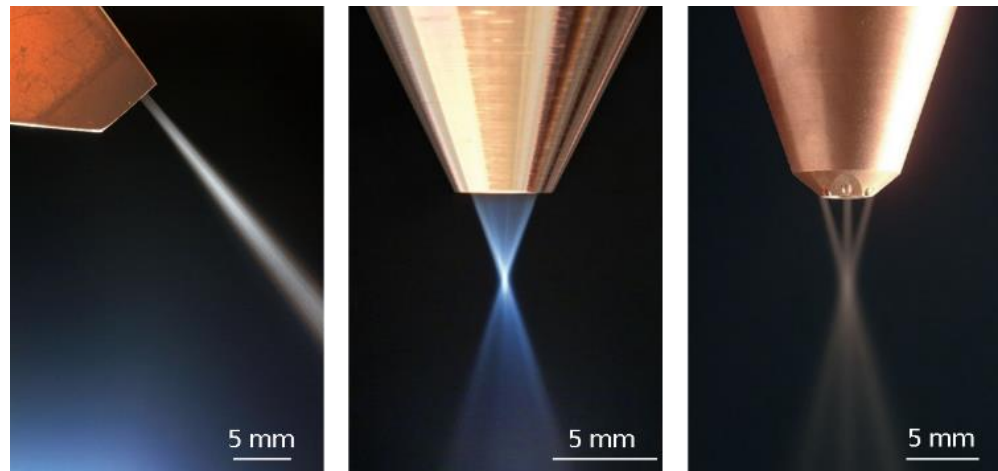
Pulverförderer

Da sich bereits kleine Abweichungen im Pulvermassenstrom negativ auf das Bearbeitungsergebnis auswirken können, kommt der kontinuierlichen und gleichmäßigen Pulverförderung eine besondere Bedeutung zu [38],[40]. Für eine präzise, pulsationsfreie Pulverförderung sind pneumatische Pulverförderer mit volumetrischem Dosierprinzip Stand der Technik [41]. Der Aufbau besteht aus einem Pulverbehälter, einem Rührer, einer Dosierscheibe und einem Antrieb, bei dem das Pulver mit einem Fördergas von einer sich drehenden Dosierscheibe mit einer Nut durch einen Pulverschlauch zur Pulverdüse befördert wird. Fördergas-Volumenstrom und Rotationsgeschwindigkeit der Dosierscheibe sind unabhängig voneinander einstellbar. Neben der Transportaufgabe erfüllt das Fördergas auch z. T. die Funktion eines Schutzgases, d. h., es dient zur Abschirmung gegen Oxidationen an der Bearbeitungsstelle. Aus diesem Grund werden dafür i. d. R. Inertgase wie z. B. Argon oder Helium eingesetzt [27]. Für den Verschleiß- und Korrosionsschutz werden beim LA Pulver mit mittleren Korngrößen im Bereich von 20 bis 100 µm aus einer Vielzahl kommerziell verfügbarer, überwiegend metallischer Legierungen auf Nickel- (z. B. NiCrMo, C276, NiCr, NiCrAl, NiBSi, NiCrBSi), Kobalt- (z. B. CoCrC, CoCrWC, CoCrMoNiC, CoCrMoWNi) oder Eisenbasis (z. B. FeNiCr, FeWMoC) oder Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe, bestehend aus einer duktilen Metallmatrix und eingebetteten Hartstoffen, wie bspw. WC, Cr₃C₂, TiC oder SiC, verwendet [30],[38],[42],[43]. Für eine umfangreiche Übersicht der eingesetzten Pulverwerkstoffe beim LA wird auf *Gu* verwiesen [44].

Pulverzufuhrdüsen

Für die gezielte Materialzufuhr an die Bearbeitungsstelle existieren je nach Anwendung für das LA unterschiedliche Düsenkonzepte: laterale, Koaxial- oder Mehrstrahldüsen. Bei eingeschränkter Zugänglichkeit, z. B. Reparatur von Nuten mit großem Aspektverhältnis (Verhältnis aus Nut-Tiefe/Breite), oder bei der Beschichtung einfacher Geometrien wie Zylindern werden häufig wassergekühlte, laterale Pulverdüsen eingesetzt (siehe Bild 2, links). Der auf die Bearbeitungsstelle projizierte Strömungsquerschnitt ist hierbei vergleichsweise groß (ca. 2 bis 3 mm). Ferner ist das Beschichtungsergebnis von der Vorschubrichtung abhängig und die Prozesseinrichtung wegen der hohen Genauigkeitsanforderungen bzgl. der Justage aufwändig [38]. Bei größeren Anforderungen bzgl. der Genauigkeit des Materialauftrages oder der Bearbeitung komplexerer Geometrien werden Pulverzufuhrdüsen verwendet, die ein richtungsunabhängiges Auftragschweißen ermöglichen. Unterschieden wird zwischen einer Koaxialdüse (siehe Bild 2, Mitte) und einer Mehrstrahldüse (siehe Bild 2, rechts). Mit Koaxialdüsen wird ein Pulver-Gas-Hohlkegel erzeugt, der die Laserstrahlung umschließt. Dabei ist die Spitze des Kegels jener Bereich, auf dem der Pulver-Gas-Strahl fokussiert wird (Pulverfokus). Mit diesem Konzept können besonders kleine Pulverfokusdurchmesser (abhängig von den Parametern für die Pulverförderung bis zu ca. 0,3 bis 1,5 mm) erreicht werden [38],[39]. Eine Verkippung der Düse aus der Vertikalen ist jedoch nur bis etwa 20° möglich.

Bild 2
Unterschiedliche Düsenvarianten für das pulverbasierte LA.
Links: Laterale Pulverzufuhrdüse
Mitte: Koaxialdüse
Rechts: Mehrstrahldüse



Bei größeren Verkipfungswinkeln wird der Pulver-Gas-Strahl-Hohlkegel durch die Wirkung der Schwerkraft verzerrt, was zu einem unsymmetrischen Schichtaufbau führt. Bei Mehrstrahl-Pulverzufuhrdüsen ist der Einfluss der Schwerkraft auf den Pulver-Gas-Strahl geringer, wodurch sich dieses Konzept insbesondere für die 3D-Bearbeitung eignet [38]. Hierbei werden mit zwei oder mehreren separaten Pulver-Gas-Teilstrahlen Pulverfokussdurchmesser von ca. 1,5 bis 2,5 mm erreicht [45]. Zur Verbesserung der Schutzgasabschirmung des Schweißgutes an der Bearbeitungsstelle strömt bei Koaxial- und Mehrstrahl-Pulverzufuhrdüsen aus der zentrischen Düsenöffnung ein Inertgas (Schutzgas). Durch ein entweder in der Optik oder der Düsenaufnahme integriertes Schutzglas wird die Bearbeitungsoptik gegen Verschmutzung abgedichtet. Neben den o. g. Pulverzufuhrdüsen existieren laterale Breitstrahldüsen für einen flächigen Materialauftrag und Konzepte für die Innenbeschichtung von Rohren [46].

2.3 Prozessrelevante Einflussgrößen

Beim LA wird durch Laserstrahlung ein Schmelzbad auf der Oberfläche des Substrates erzeugt. Gleichzeitig wird der pulverförmige Zusatzwerkstoff mit Hilfe der Pulverzufuhrdüse an die Bearbeitungsstelle bzw. in das Schmelzbad geführt. Damit beim LA eine defektfreie, schmelzmetallurgisch angebundene Schicht entsteht, müssen die Verfahrensparameter (Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit, Pulvermassenstrom etc.) so ausgelegt werden, dass die zur Verfügung gestellte Prozesswärme ausreicht, um einen geeigneten Temperatur-Zeit-Zyklus für den Grund- sowie den Zusatzwerkstoff zu initiieren. Damit soll sowohl ein Schmelzbad auf der Substratoberfläche erzeugt als auch ein vollständiges Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes gewährleistet werden. Durch die Relativbewegung zwischen Laserstrahlung und Substrat entsteht nach der Erstarrung der Schmelze eine dichte und metallurgisch angebundene Schweißraupe. Die wesentlichen prozessrelevanten Einflussgrößen zur Ausbildung eines schmelzmetallurgischen Verbunds sind schematisch in Bild 3 dargestellt.

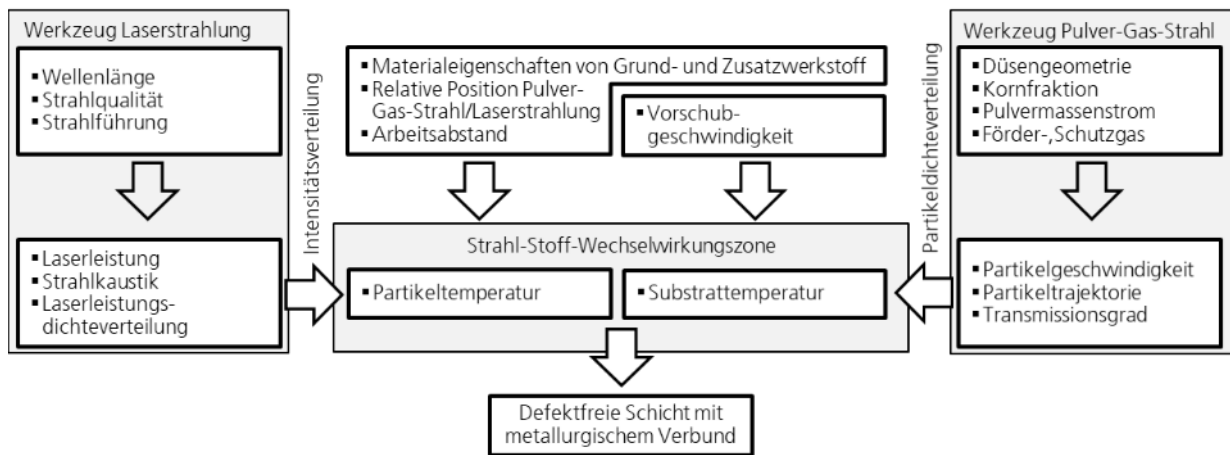


Bild 3 Schematische Darstellung der Einflussgrößen beim pulverbasierten LA

Durch Überlagerung mehrerer Schweißraupen kann eine flächige Beschichtung hergestellt werden. Werden mehrere Schichten übereinander auftraggeschweißt, kann das Verfahren darüber hinaus auch für die Reparatur, die additive Fertigung oder für die hybride-additive Fertigung, d. h. die additive Fertigung von Volumina auf bereits vorhandenen konventionell gefertigten (z. B. Gießen, Schmieden) Basisgeometrien, bspw. zur geometrischen Modifikation genutzt werden.

Werkzeug Laserstrahlung

Zur Charakterisierung der Laserstrahlung werden für eine gegebene Wellenlänge i. d. R. vier Parameter angegeben: Strahldurchmesser, Laserleistung, Strahlkaustik und Grundform der Laserleistungsdichteverteilung, z. B. gauß- [47]–[50] oder Top-Hat-förmig [51],[52]. Jedoch kann der Verlauf der Dichteverteilung eine Vielzahl unterschiedlicher Zwischenprofile annehmen, die von diesen Standard-Verteilungen abweichen, wodurch die Prozessbedingungen signifikant beeinflusst werden können [53]. Unterschiedliche Konzepte zur Laserstrahlformung und -führung sowie der Einfluss auf die sich ausbildende Laserleistungsdichte und Strahlkaustik sind in der Literatur bspw. in *Beyer et al.* [28] oder *Poprawe et al.* [54] ausführlich beschrieben.

Werkzeug Pulver-Gas-Strahl

Die Ausbildung des Pulver-Gas-Strahls (Partikelgeschwindigkeit, -trajektorie) und damit der Pulverpartikeldichteverteilung ist neben dem eingesetzten Düsenkonzept und der Düsengeometrie insbesondere von der Kornfraktion des Pulvers sowie den Verfahrensparametern für die Pulverförderung (Pulvermassenstrom, Förder- und Schutzgas-Volumenstrom) abhängig. Die Pulver-Gas-Strömung stellt hierbei eine disperse, verdünnte Zweiphasen-Feststoffströmung bestehend aus den Pulverpartikeln (disperse Phase) und dem Trägergas (kontinuierliche Phase) dar. Je nach Grad der wechselseitigen Beeinflussung können sowohl Partikel-

Partikel- als auch Partikel-Düsenwandkollisionen auftreten [55]–[59]. Die Partikel werden mit dem Fördergas so in den Bearbeitungskopf eingeführt, dass deren Verteilung über Partikel-Wandkollisionen bis zum Düsenausgang über den Querschnitt homogenisiert wird. An der Düsen Spitze tritt die Pulver-Gas-Strömung zusammen mit dem Schutzgas in ein anfänglich ruhendes Umgebungsmedium aus und bildet nach der turbulenten Vermischung und Verwirbelung mit dem Umgebungsmedium einen Freistrah aus [60]–[64]. Durch die Ausrichtung des Bearbeitungskopfes auf die Prozesszone an der Substratoberfläche wird der ursprüngliche Freistrah zu einem Prallstrahl. Die Komponente der Strömungsgeschwindigkeit des Gases in Richtung der Strahlachse reduziert sich bei Kontakt mit der Substratoberfläche auf null [65]–[67]. Die Geschwindigkeit der Partikel wird in Abhängigkeit des Partikelfolgevermögens reduziert, wobei die Pulverpartikel noch eine ausreichende Geschwindigkeit haben können, um z. B. vollständig in die Schmelze einzutauchen.

Die Pulver-Gas-Strömung ist durch die volumenbezogenen Erhaltungssätze von Masse, Impuls und Energie (die Navier-Stokes-Gleichungen) vollständig beschrieben. Die Strömungsvorgänge sind jedoch derart komplex, dass sie in der Praxis zurzeit nicht ohne die Annahme vereinfachender Randbedingungen und Wechselwirkungen simuliert werden können. Relevant für die Wechselwirkung der Partikel mit der Laserstrahlung sind einzig deren Trajektorien und Geschwindigkeit hinter dem Düsenausgang, woraus sich in Abhängigkeit der Kornfraktion und des Pulvermassenstroms der Transmissionsgrad und die Erwärmung der Partikel vor dem Kontakt mit dem Substrat ableiten. Zur mathematischen Beschreibung des sich hinter der Düsen Spitze ausbildenden Pulver-Gas-Strahls werden in der Literatur numerische sowie analytische Modelle unterschiedlicher Detaillierungsgrade, Gültigkeitsbereiche und Annahmen beschrieben. Numerisch wird der Pulver-Gas-Strahl in den meisten Fällen mit dem Standard k - ϵ Turbulenz-Modell für turbulente Zweiphasenströmungen beschrieben [68]–[72]. Beim k - ϵ -Modell handelt es sich um ein Transportgleichungs-Wirbelviskositätsmodell, bei dem die turbulente Strömung mit den beiden Parametern k für die turbulente kinetische Energie und ϵ für die Dissipationsrate beschrieben wird. Für das Prozessverständnis und die Beschreibung der Wechselwirkung sind die Details der Zweiphasenströmung innerhalb der Düse irrelevant, es sei denn, es sollen Maßnahmen für die Düsenauslegung abgeleitet werden, um z. B. bestimmte Partikelgeschwindigkeiten oder -trajektorien einzustellen. Bei der analytischen Beschreibung des Pulver-Gas-Strahls wird die Pulverpartikeldichteverteilung zumeist auf Basis einer zweidimensionalen, radialsymmetrischen Gaußverteilung angenähert. Dazu werden die freien Parameter der Normalverteilung abhängig von der Düsengeometrie und dem Vergleich zu experimentellen Ergebnissen definiert. Da die Gaußverteilung radialsymmetrisch ist, gelten diese Modelle erst ab dem Bereich der Konsolidierung des Pulver-Gas-Strahl-Hohlkegels (Pulverfokus). Der Bereich vor dem Zusammentreffen der ringförmigen Pulververteilung wird entweder nicht modelliert [73]–[76], durch Teilstrahlen approximiert [50],[51], [77] oder es wird angenommen, dass die Partikeldichte-Verteilung des Pulver-Gas-Strahls

bereits unmittelbar nach der Düsenspitze gaußförmig verteilt ist [48],[49],[74]. Bei der Wechselwirkung von Laserstrahlung und Pulverpartikeln oberhalb des Schmelzbades wird ein Teil der Laserstrahlung vom Pulver absorbiert. Der nicht absorbierte Anteil wird (mehrfach) reflektiert oder transmittiert. Der durch die Pulverpartikel absorbierte Strahlungsanteil führt zu einer Erwärmung der Pulverpartikel. Durch den transmittierten Strahlungsanteil wird das Schmelzbad erzeugt. Das Verhältnis aus eingestrahelter zu transmittierter Laserleistung ist der ortsabhängige Transmissionsgrad.

Partikeltemperatur

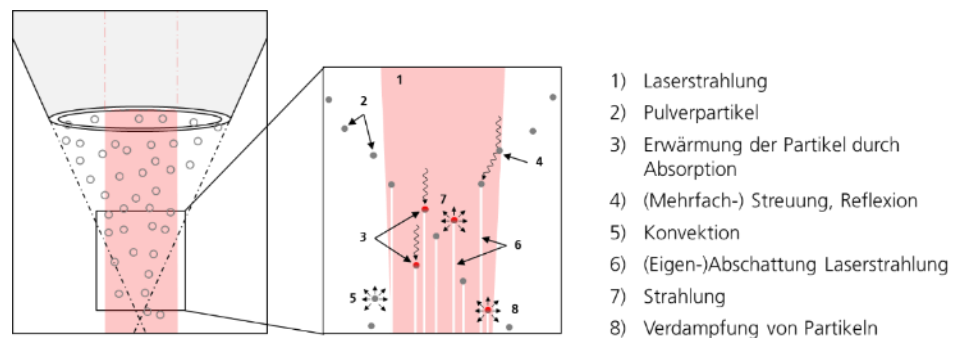
Die Erwärmung der Pulverpartikel im Strahlengang oberhalb des Schmelzbades wird neben den thermophysikalischen und optischen Materialeigenschaften des Zusatzwerkstoffs (spezifische Wärmekapazität, Dichte, Absorptionsgrad etc.) maßgeblich durch die Wechselwirkungszeit der Partikel mit der Laserstrahlung (relative Position von Pulver-Gas-Strahl und Laserstrahlung, Partikelgeschwindigkeit und -trajektorie, Transmissionsgrad), die Kornfraktion sowie die Intensitätsverteilung (Laserleistung, Strahlkaustik, Laserleistungsdichteverteilung) beeinflusst. Die Erwärmung der Partikel erfolgt durch die Wechselwirkung der einzelnen Partikel entlang ihrer spezifischen Trajektorie bis zur Zielebene z und ist durch Formel 2.1 nach [50] gegeben. Darin sind: ΔT_i die Temperaturänderung eines einzelnen Partikels i entlang der Weglänge L_i , A der Absorptionsgrad, I die orts aufgelöste Intensitätsverteilung entlang der Partikeltrajektorie S_i , ρ_p die Dichte des Werkstoffes, $c_p(T)$ die temperaturabhängige Wärmekapazität, r_p der Partikelradius und v_p die Partikelgeschwindigkeit.

$$2.1 \quad \Delta T_i = \frac{3}{4} \cdot \frac{A}{\rho_p c_p(T) r_{p,i}} \cdot \frac{L_i}{v_p} \int_0^z I(S_i) dS_i$$

Dabei ist der Unterschied der Partikeltemperaturen umso größer, je größer der Divergenzwinkel des Pulver-Gas-Strahls ist bzw. umso größer der Pulverfokus und desto größer die Breite der Kornfraktion ist. Die Berechnung der absorbierten Energie für pulverförmige Werkstoffe, die in der Praxis eingesetzt werden, ist im Allgemeinen nur näherungsweise möglich, da die Partikelmorphologie und die chemische Beschaffenheit der Oberfläche bereits innerhalb einer Pulvercharge erheblich variieren und die exakten optischen Eigenschaften (Einfallswinkel, Polarisation etc.) nicht hinreichend berücksichtigt werden können. In der Praxis wird daher die Beschreibung häufig mit temperaturgemittelten Werkstoffparametern und ideal sphärischen Partikeln vereinfacht [78],[79]. Die Messung der Partikeltemperaturen in der Wechselwirkungszone ist in der Praxis wegen der kleinen Zeitskalen infolge von Partikelgeschwindigkeiten im Bereich einiger Meter pro Sekunde und der geringen Abmessungen der Wechselwirkungszone im Millimeterbereich nicht mit hinreichender Auflösung direkt messbar [78]–[80]. Der nicht von den Pulverpartikeln absorbierte Strahlungsanteil wird entweder gestreut, (mehrfach) reflektiert oder transmittiert [81]. Ein Teil der transmittierten Laserstrahlung wird durch die Substratoberfläche reflektiert, wodurch die Partikel

zusätzlich erwärmt werden (vgl. Kap. 6.2). Der Energieaustausch der erwärmten Partikel mit der Umgebung wird im Wesentlichen durch zwei physikalische Effekte bestimmt, den konvektiven Wärmeübergang zwischen Partikel und Gasphase sowie den Strahlungsaustausch mit der Umgebung [82]. Aufgrund des großen Partikelfolgevermögens kann ein Wärmeübergangskoeffizient für eine ruhende Umgebungsatmosphäre angenommen werden. Im Vergleich zur aufgenommenen Leistung ist die durch Konvektion abgegebene Leistung jedoch vernachlässigbar gering. Auch der Einfluss von Mehrfachstreuung auf die Partikelerwärmung kann aufgrund der um Größenordnungen höheren Energieaufnahme durch die Laserstrahlung vernachlässigt werden [82]. In Bild 4 sind die Teilprozesse bei der Wechselwirkung zwischen Pulverpartikeln und Laserstrahlung schematisch dargestellt.

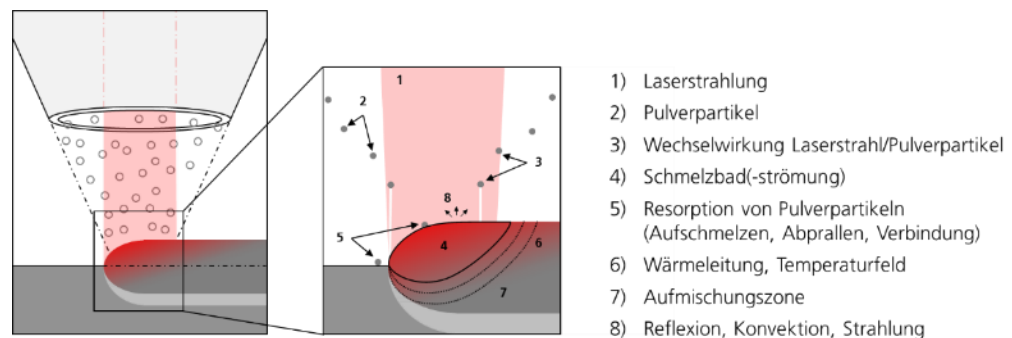
Bild 4
Schematische Darstellung der physikalischen Prozesse bei der Wechselwirkung von Laserstrahlung und Pulverpartikeln



Substrattemperatur

Für die Ausbildung des Schmelzbades steht der von der Pulver-Gas-Strömung transmittierte Strahlungsanteil zur Verfügung. In Abhängigkeit der optischen und thermophysikalischen Eigenschaften des Substrates (spez. Wärmekapazität, Dichte, Absorptionsgrad etc.), der Vorschubgeschwindigkeit und des Arbeitsabstandes wird der transmittierte Strahlungsanteil teilweise reflektiert, teilweise im Grundwerkstoff absorbiert und durch Wärmeleitung in das Werkstück transportiert. Je größer der Transmissionsgrad, desto größer ist der Energieeintrag in das Substrat und in der Folge die Substrattemperaturen. In Bild 5 sind die Prozesse bei der Ausbildung des Temperaturfeldes im Substrat und dem Schweißgut schematisch abgebildet.

Bild 5
Schematische Darstellung der physikalischen Prozesse bei der Ausbildung des Temperaturfeldes und der Schweißraupe beim LA



Im Vergleich zum gesamten Werkstückvolumen werden beim LA im Allgemeinen kleine Volumina aufgeschmolzen, sodass der dominierende Prozess für die Abkühlung die Wärmeleitung in das umgebende Material (Selbstabschreckung) ist. Kennzeichnend dafür sind die großen Aufheiz- und Abkühlraten im Bereich von 10^3 bis 10^4 Ks^{-1} , wodurch feine Gefügestrukturen im Mikrometerbereich erzeugt werden [28],[54],[83]. Der Zusammenhang zwischen der zeitlichen und der räumlichen Änderung des Temperaturfeldes im Grundwerkstoff wird durch die Wärmeleitungsgleichung beschrieben [53],[84]. Die Wärmeleitungsgleichung ist eine nichtlineare, partielle, parabolische Differentialgleichung und leitet sich aus einer lokalen Bilanz für die thermische Energie ab. Aufgrund der geringen optischen Eindringtiefe der Laserstrahlung wird bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit sowohl die Schmelzbadtiefe als auch die Verweildauer der Partikel in der Schmelze verringert.

Resorption der Pulverpartikel im Schmelzbad und Spurbildung

Welcher Anteil des zugeführten Pulvers zu einem Volumenzuwachs der Schicht beitragen kann, ist von der Temperaturverteilung im Substrat bzw. der Ausdehnung der Schmelze in der Prozesszone, in der die Partikel absorbieren/eintauchen können, sowie der Existenzdauer der Schmelze abhängig. Um eine schmelzmetallurgische Anbindung des Zusatzwerkstoffs an das Substrat sicherzustellen, ist es erforderlich, dass sowohl das Substrat als auch die Pulverpartikel vollständig aufschmelzen. Die Zeit zum Aufschmelzen der Partikel im Schmelzbad ist dabei umso geringer, je größer die Schmelzbad- und Partikeltemperatur ist und/oder je geringer die Korngröße ist. Um die latente Wärme zum Aufschmelzen der Pulverpartikel im Schmelzbad bereitzustellen, muss die Temperatur des Schmelzbades deutlich größer als Schmelztemperatur sein, hinreichend lange existieren, um die Partikel binnen einiger Millisekunden dort vollständig aufzuschmelzen, und ausreichend groß (Schmelzbadtiefe und -breite) sein, um die Partikel aufzunehmen, d. h. resorbieren zu können [46],[84]. Feste Partikel, deren kinetische Energie zu gering ist, um die Oberflächenspannung der Schmelze zu überwinden, werden durch Schmelzbadkonvektion auf der Schmelzbadoberfläche zum Schichtrand transportiert, wobei sie noch weiter erwärmt werden, ggf. schmelzen oder sich am Rand der Schicht ablagern [46]. Wird dabei die Schmelztemperatur erreicht, können sie vom Schmelzbad resorbiert werden. Vollständig aufgeschmolzene Partikel, die außerhalb des Schmelzbades auf die Substratoberfläche treffen, können mit dem Substrat verschweißen [85]–[95]. Feste Partikel, die auf ein nicht aufgeschmolzenes Substrat treffen, prallen von der Oberfläche ab und tragen damit nicht zur Spurbildung bei [83].

2.4 Prozessführungsstrategien

Gemäß einer Wärmestrombilanz an der Schmelzbadoberfläche ergibt sich der Wärmestrom aus der thermalisierten, transmittierten Strahlung vermindert um den Wärmestrom durch den Temperatenausgleich zwischen den Pulverpartikeln und der Schmelzbadoberfläche sowie dem Wärmeverlust durch Strahlung. Die mathematische Beschreibung der Wärmebilanz an der Schmelzbadoberfläche

mit dem Anteil transmittierter Strahlung I_{trans} , dem Pulvermassenstrom $\dot{m}_p$, der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität c_p , der Werkstoffdichte ρ_p , dem Emissionsgrad ε , der Stefan-Boltzmann-Konstante σ , dem Temperaturausgleich zwischen der Temperatur an der Schmelzbadoberfläche T_s und der mittleren Partikeltemperatur T_p , ist durch Formel 2.2 gegeben [53],[96]:

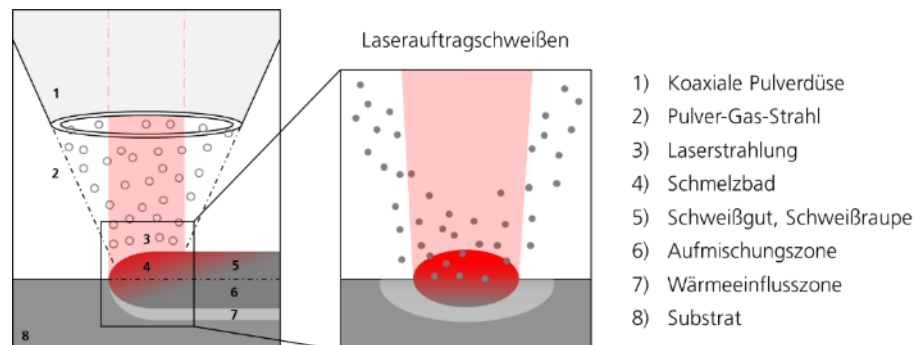
$$2.2 \quad \lambda(\nabla T, \vec{n}) = \langle \vec{I}_{trans}[x(t), y(t)], \vec{n} \rangle - \dot{m}_p \rho_p c_p (T_s - T_p) - \varepsilon \sigma T^4$$

Abhängig von der Differenz aus Partikeltemperatur und Schmelzbadtemperatur ($T_s - T_p$), ist der zweite Term ein Quell- oder Verlustterm für den, im Falle von Partikeltemperaturen kleiner als der Schmelztemperatur T_M , eine entsprechende Schmelzwärme berücksichtigt werden muss [53]. Je nach Partikeltemperatur vor Eintreffen in das Schmelzbad werden zwei unterschiedliche Prozessführungsstrategien unterschieden: das konventionelle LA mit Partikeltemperaturen, die überwiegend kleiner als Schmelztemperatur $T_p < T_M$, bzw. $(T_s - T_p) > 0$ sind, sowie das EHLA-Verfahren, bei dem ein großer Anteil der Partikel bereits vor Eintreffen in das Schmelzbad durch die Laserstrahlung vollständig aufgeschmolzen werden soll $T_p > T_M$, bzw. $(T_s - T_p) < 0$ [33]–[36].

Laserauftragschweißen ($T_s - T_p > 0$)

In Bild 6 ist das Verfahrensprinzip des konventionellen LA mit einer kontinuierlichen koaxialen Pulverzufuhrdüse abgebildet. Bei der konventionellen Prozessführung ist die Wechselwirkungszeit zwischen Pulverpartikeln und Laserstrahlung vergleichsweise kurz. Damit ist die Partikeltemperatur vor Eintritt in das Schmelzbad i. d. R. deutlich kleiner als die Schmelztemperatur, sodass die Partikel erst im Schmelzbad vollständig aufgeschmolzen werden [78]–[80],[97]. Abhängig von den verwendeten Pulverdüsen, der Kornfraktion sowie der relativen Position von Pulverzufuhrdüse und Laserstrahlung sowie dem Arbeitsabstand wird bei der bisherigen Prozessführung ein Großteil der eingestrahnten Laserstrahlung zum Substrat transmittiert, wodurch sich eine verhältnismäßig große Wärmeeinflusszone mit Abmessungen im Bereich von einigen Zehntel bis zu einem Millimeter ergibt [26]–[28],[80],[82], [98],[99].

Bild 6
Schematische Darstellung des Verfahrensprinzips beim LA



In Tabelle 1 sind typische Parameter und Kenngrößen für das Auftragen von Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten mittels LA in der industriellen Praxis und der Forschung (F&E) mit koaxialer Pulverzufuhr und lateralen Breitstrahldüsen dargestellt [98],[31]–[107]. Wirtschaftliche Flächenraten im Bereich einiger hundert Quadratzentimeter pro Minute können mit konventionellem LA bislang nur durch flächige, bis zu 20 mm breite Spuren und den Einsatz leistungstarker Laserstrahlquellen mit Ausgangsleistungen von bis zu 20 kW bei Vorschubgeschwindigkeiten von 0,5 bis 2 m/min erreicht werden [31],[32].

Kenngrößen/Parameter	Laterale (Breitstrahl-)Düse			Koaxialdüse	
	Industrie	F&E		Industrie	F&E*
Schichtdicke [mm]	1–2	ca. 1,5	ca. 0,4	0,5–2	ca. 1
Vorschub [m/min]	0,5–1	1,54	6–18	0,5–2	3,9
Flächenrate [cm ² /min]	75–150	195	< 100	10–50	293
Auftragrate [kg/h]	5–10	14,25	< 3	< 5	14,72
Laserleistung [kW]	7–8	20	≤ 2,4	1–6	20
Strahlabmessungen	3 x 24 mm ²	k. A.	Ø 1,6 mm	Ø 1–6 mm	k. A.

Tabelle 1 Relevante Parameter und Kenngrößen für das LA zum Auftragen von Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten.

* mit induktiver Vorwärmung [31],[32],[98],[107].

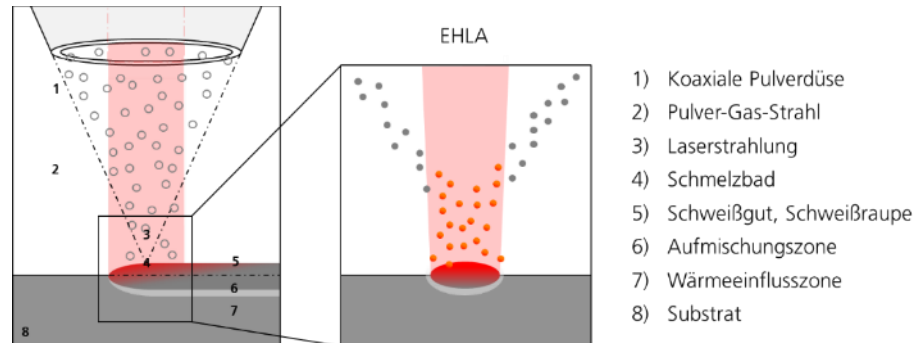
Gegenüber einer Flächenrate von ca. 10 bis 50 cm²/min für die koaxiale Pulverzufuhr können die Flächenraten durch den Einsatz von Breitstrahldüsen und Strahlquellen mit Laserleistungen von bis zu 8 kW auf bis zu 150 cm²/min gesteigert werden [32]. Bei Vergrößerung der Laserleistung auf bis zu 20 kW kann eine weitere Vergrößerung der Flächenrate auf bis zu 195 cm²/min erreicht werden [31]. Durch zusätzliche induktive Vorwärmung ist es möglich, die Flächenrate bei Einsatz von Koaxial-Pulverdüsen auf bis zu ca. 300 cm²/min zu vergrößern [31]. Diese Weiterentwicklungen des konventionellen LA in Richtung größerer einsetzbarer Laserleistungen führten zwar zu einer Vergrößerung der Flächen- und insbesondere der Auftragrate von 5 kg/h auf bis zu knapp 15 kg/h, jedoch bis dato nicht zu einer breiten industriellen Anwendung des Verfahrens in Massenmärkten (2019). Wesentliche Defizite bei der flächigen Bearbeitung sind der zu große Energieeintrag und die daraus u. U. resultierenden unerwünschten Gefügeveränderungen im Grundwerkstoff sowie die geringe Maßhaltigkeit infolge von Verzug. Ferner sind damit erreichbare Schichtdicken mit 0,5 bis 2 mm in Bezug auf Materialeinsatz und Nachbearbeitungsaufwand gegenüber geforderten Schichtdicken von 10 bis 250 µm zu groß. Darüber hinaus sind Investitionen zur Nutzung des Werkzeugs Laserstrahlung im Vergleich zu konkurrierenden Energiequellen kostenintensiv. Im Schichtdickenbereich ≥ 0,5 mm bieten konventionelle Auftragschweißverfahren, wie das Wolfram-Inert-Gas- oder das Plasma-Pulver-Auftragschweißen, i. A. derzeit Kostenvorteile. Damit rechtfertigen die o. g. Vorteile nur selten die mit der Beschaffung entsprechender Strahlquellen verbundenen Investitionssummen im Bereich einiger hundert Tausend Euro [29],[46].

In den einzigen bekannten Arbeiten zur Vergrößerung der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit beim LA von *Partes et al.* wurde gezeigt, dass mit einer lateralen Pulverzufuhrdüse Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu etwa 18 m/min bei Schichtdicken von ca. 0,4 mm und Flächenraten von bis zu ca. 100 cm²/min erreicht werden können [98]. Dazu wurden die Verfahrensparameter so angepasst, dass sowohl die Streckenenergie (Verhältnis Laserleistung/Vorschubgeschwindigkeit) als auch die Streckenmasse (Verhältnis Vorschubgeschwindigkeit/Pulvermassenstrom) konstant sind. Untersucht wurden Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von 3,6 bis 21 m/min bei einem Strahldurchmesser von 1,6 mm und Pulvermassenströmen von ca. 8,4 bis 42 g/min. Bei Vergrößerung des Pulvermassenstroms von 8,4 g/min auf 42 g/min wurde eine Verringerung der Partikelgeschwindigkeit von ca. 7,8 m/s auf etwa 4 m/s gemessen. Gleichzeitig konnte experimentell gezeigt werden, dass der Transmissionsgrad bei Vergrößerung des Pulvermassenstroms von etwa $T = 0,97$ auf ca. $T = 0,65$ verringert wird. Aufgrund des Versuchsplandesigns mit konstanter Streckenenergie und -masse wurde bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit eine zunehmende Energieaufnahme der Pulverpartikel beobachtet. Durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurde gezeigt, dass die gemessene Schmelzbadlänge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit respektive Vergrößerung der Laserleistung und des Pulvermassenstroms von ca. 1,3 mm ($v_v = 3,6$ m/min) auf bis zu ca. 3,2 mm ($v_v = 21$ m/min) zunimmt. Gleichzeitig konnte eine Vergrößerung des Pulver-Auftragswirkungsgrades von ca. 10 % ($v_v = 3,6$ m/min) auf bis zu etwa 40 % ($v_v = 21$ m/min) gemessen werden, was neben der größeren Wahrscheinlichkeit des Eintauchens der Partikel in ein größeres Schmelzbad auch auf den größeren Energieeintrag in die Pulverpartikel zurückgeführt wurde. Das Prozessfenster wurde durch eine Qualitätszahl beschrieben, bei der Pulvernutzungsgrad, energetische Effizienz, Auftragsrate sowie Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt wird. Das Maximum der Qualitätszahl wurde dabei für den Verfahrensparametersatz bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 18 m/min erreicht. Bei weiterer Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit auf bis zu 21 m/min wurde aufgrund von Schichtdefekten (nicht aufgeschmolzenes Pulver, Anbindungsdefekte etc.) und unwirtschaftlichen Aufwänden für die Nachbearbeitung der Anteil der nutzbaren Schicht drastisch verringert [98]. Dünnere defektfreie Schichten mit Schichtdicken $< 0,4$ mm können mit der Prozessführung beim konventionellem LA bislang nur bei Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich einiger 100 mm/min erzielt werden [108]–[110].

Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen ($T_s - T_p < 0$)

In Bild 7 ist das Verfahrensprinzip des EHLA-Verfahrens dargestellt. Beim EHLA wird der pulverförmige Zusatzwerkstoff bereits gezielt oberhalb des Schmelzbades auf der Substratoberfläche durch die Wechselwirkung mit der Laserstrahlung aufgeschmolzen und dem Schmelzbad in demselben Aggregatzustand, d. h. flüssig, zugeführt [33]–[36]. Dadurch entfällt die Zeit zum Aufschmelzen der Partikel im Schmelzbad, wodurch eine Vergrößerung der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten auf Werte ≥ 150 m/min ermöglicht wird [36].

Bild 7
Schematische Darstellung des Verfahrensprinzips beim EHLA

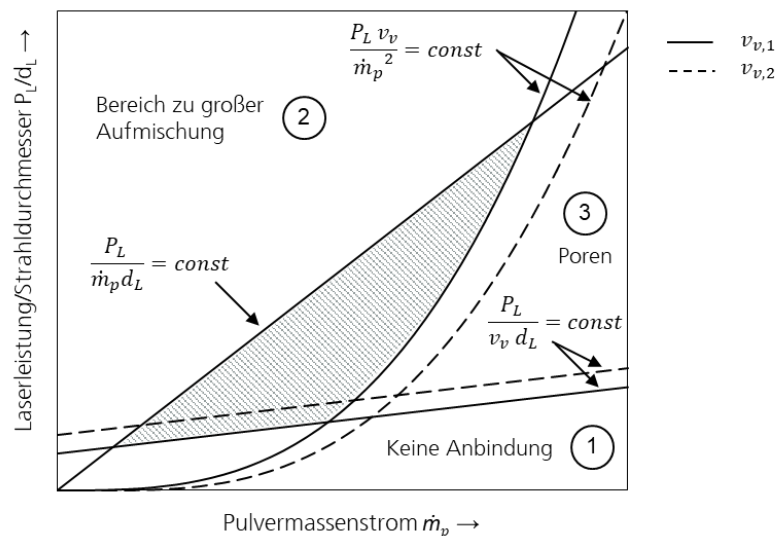


Dazu muss das Verhältnis aus transmittierter zu der von den Pulverpartikeln absorbierten Laserstrahlung so eingestellt werden, dass der Wärmeeintrag ausreichend ist, um einerseits die Partikel bereits im Strahlengang vollständig aufzuschmelzen und andererseits ein Schmelzbad auf der Substratoberfläche zu erzeugen. Die Zeit zum Aufschmelzen der Pulverpartikel im Strahlengang oberhalb des Schmelzbades ist abhängig von der Partikelgröße, der Aufenthaltsdauer der Partikel im Laserstrahl sowie der Laserstrahlungsintensität [36]. Für die Partikelgröße gilt allgemein, dass umso kleiner das Partikel, desto kürzer die Zeit, bis es aufgeschmolzen ist. Je länger die Aufenthaltsdauer der Partikel im Laserstrahl, desto größer die Partikeltemperatur. Eine gleichmäßige Erwärmung der Partikel ist aufgrund unterschiedlicher Partikelgrößen und -trajektorien technisch nicht möglich; jedoch sind die Unterschiede der Partikeltemperaturen umso geringer, je kleiner die Breite der Kornfraktion und desto kleiner der Pulverfokus ist. Durch Vergrößerung der Laserstrahlungsintensität wird die Zeit zum Aufschmelzen des pulverförmigen Zusatzwerkstoffs im Strahlengang verkürzt. Die Intensität der Laserstrahlung kann dabei einerseits durch Erhöhung der Laserleistung und/oder andererseits auch durch Verkleinerung der Strahlfläche erreicht werden [36]. Um ein hinreichend schnelles Aufschmelzen der Pulverpartikel zu bewirken, muss bei gegebenem Strahldurchmesser eine ausreichende Laserleistung eingestrahlt werden. Da jedoch durch die Laserstrahlung auch das Schmelzbad erhitzt wird, kann unter Umständen eine zum schnellen Schmelzen des Pulvers ausreichende Laserleistung zur Folge haben, dass das Schmelzbad zu stark erwärmt wird. Dies kann dazu führen, dass sich der aufgebrauchte Zusatzwerkstoff im Bereich des Schmelzbades zu einem unerwünscht hohen Grad mit dem Werkstoff des Substrates vermischt. In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann der Energieeintrag in das Schmelzbad und damit auch die Aufmischung kontrolliert werden, indem die Pulverpartikel der Laserstrahlung mit einer hinreichend großen Pulverpartikeldichte zugeführt werden. Dabei ist der Anteil der Laserleistung, der in das Schmelzbad eingestrahlt wird, umso geringer, je größer die Pulverdichte eingestellt wird [36]. Nach dem bisherigen Stand der Technik existieren jedoch für die Prozessführung beim EHLA bislang keine Werkzeuge bzw. Methoden, um die prozessrelevanten Einflussgrößen wie Transmissionsgrad, Partikelerwärmung im Strahlengang, Erwärmung des Substrates und Spurbildung zu beschreiben.

2.5 Prozessgrenzen

In der Literatur werden unterschiedliche Prozessgrenzen für das LA diskutiert, durch die ein Prozessfenster begrenzt wird, innerhalb dessen defektfreie, schmelzmetallurgisch angebundene Schichten mit geringer Aufmischung, geeignetem Spurwinkel für Überlappspuren und gewünschter Schichtdicke hergestellt werden können. Dazu werden meist Kombinationen aus den vier Verfahrensparametern Laserleistung, Strahldurchmesser, Pulvermassenstrom und Vorschubgeschwindigkeit verwendet. Das Verlassen des Prozessfensters ist im Wesentlichen durch drei Effekte gekennzeichnet: mangelhafte Anbindung, zu große Aufmischung (> 5 %) oder Porenbildung [100]. In Bild 8 sind schematisch die Prozessgrenzen nach *Steen et al.* mit Angabe der 3 begrenzenden Verfahrensparameterkombinationen und dem Prozessfenster (schraffiert) abgebildet. Durch die gestrichelten Linien werden die Prozessgrenzen bei Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit v_v beschrieben.

Bild 8
Schematische Darstellung der Prozessgrenzen beim LA nach [100].
Gestrichelte Linie: größere Vorschubgeschwindigkeit



Bereich 1 wird durch die erforderliche Laserleistung zur Erzeugung eines Schmelzbads an der Werkstückoberfläche begrenzt. Aufgrund von zunehmenden Abschattungseffekten bei Vergrößerung des Pulvermassenstroms ist der Verlauf der begrenzenden Linie eine Gerade. Bei Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit (gestrichelte Linie) muss eine größere Laserleistung zur Verfügung gestellt werden, um ein Schmelzbad zu erzeugen. Bereich 2 wird durch die maximal einsetzbare Laserleistung bei gegebenem Pulvermassenstrom begrenzt. Je größer der Pulvermassenstrom, desto größer kann die Laserleistung nahezu unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit gewählt werden, ohne Schichten mit einem unerwünscht großen Aufmischungsgrad (> 5 %) herzustellen. Bereich 3 wird durch ein Aspektverhältnis (Spurbreite/-höhe) begrenzt, bei dem Porenbildung im Überlappungsbereich zwischen zwei Schichten auftreten kann.

Die quadratische Funktion verläuft so, dass ein konstantes Aspektverhältnis zu erwarten ist. Für defektfreie Schichten wurde von *Steen et al.* ein Aspektverhältnis > 5 angegeben. In *Kreutz et al.* wurden die Prozessgrenzen durch Geraden konstanter Intensität in einem Graphen mit einem Auftrag der Spurhöhe über dem Verhältnis aus Pulvermassenstrom und Vorschubgeschwindigkeit bestimmt [101]. Unterhalb einer minimalen Intensität entstehen Bindefehler, oberhalb einer Schwellintensität wird der Aufmischungsgrad unerwünscht groß. Bei *Zhong et al.* wurde das Prozessfenster zur Herstellung von Einzelspuren durch obere und untere Grenzen für das Verhältnis aus Laserleistung und Pulvermassenstrom (Energy Mass Density, *EMD*) sowie für das Verhältnis aus Laserleistung und dem Produkt aus Vorschubgeschwindigkeit und Strahldurchmesser (Energy Area Density, *EAD*) begrenzt [102]. Bei *Costa et al.* wurden Prozessfenster für bestimmte Schichthöhen, Aufmischungsgrade und Spurwinkel mit Hilfe von drei Parameterkombinationen Φ_1 bis Φ_3 aus Laserleistung P_L , Pulvermassenstrom $\dot{m}_p$ und Vorschubgeschwindigkeit v_v , beschrieben, Formel 2.3 [103].

2.3

$$\Phi_1 = \sqrt{P_L \dot{m}_p / v_v^2} ; \Phi_2 = P_L \dot{m}_p / v_v ; \Phi_3 = v_v / \dot{m}_p$$

Analog wurden durch *de Oliveira et al.* sieben empirische lineare Zusammenhänge weiterer Verfahrensparameterkombinationen aus Laserleistung, Pulvermassenstrom und Vorschubgeschwindigkeit auf Spurbreite, Spurhöhe, Spurfläche, Schmelzbadgröße, Spurwinkel, Aufmischungsgrad und Pulvernutzungsgrad beschrieben [104]. Durch *Sun et al.* und *Cheikh et al.* wurden mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans quadratische Regressionsfunktionen zur Abschätzung der Spurbreite und -höhe sowie des Aufmischungsgrades auf Basis von Kombinationen der Verfahrensparameter Laserleistung, Pulvermassenstrom und Vorschubgeschwindigkeit bestimmt [105],[106].

Für das EHLA-Verfahren liegt gemäß des aktuellen Stands der Technik bislang kein ausreichendes Prozessverständnis vor, um die technologischen Grenzen der Prozessführung hinsichtlich der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit, der Flächenrate, des Aufmischungsgrades, des Pulverwirkungsgrads oder der Spurbildung zu beschreiben.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zielsetzung und Forschungsfragen

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Vergrößerung des Prozessverständnisses für das EHLA-Verfahren auf Basis experimenteller und modelltheoretischer Untersuchungen zur Herstellung von 10 bis 250 µm dünnen, defektfreien, schmelzmetallurgisch angebundenen Metallschichten für den Verschleiß- und Korrosionsschutz mit Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min. Dazu werden zwei Forschungsfragen formuliert:

- 1.) Mit welchen experimentellen- und modelltheoretischen Methoden können Aussagen zum Transmissionsgrad, der Partikelerwärmung im Strahlengang, der Erwärmung des Substrates und der Spurbildung für das EHLA-Verfahren getroffen werden?
- 2.) Worin bestehen bei der verwendeten Systemtechnik die Prozessgrenzen bzgl. der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit und der Spurbildung zur Herstellung von 10 bis 250 µm dünnen defektfreien, schmelzmetallurgisch angebundenen Schichten beim EHLA-Verfahren und wie können diese Grenzen überwunden werden?

Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Untersuchung der Forschungsfragen ist schematisch in Bild 9 dargestellt. In Kap. 5 werden die Werkzeuge für das EHLA, d. h. der Pulver-Gas-Strahl und die Laserstrahlung, vermessen und erstmalig mit einem mathematischen Modell beschrieben, dessen Annahmen aus experimentellen Beobachtungen abgeleitet werden. Mit Hilfe eines Messgerätes auf Basis des Laserlichtschnittverfahrens werden ebenenweise die Anzahl und Position der Pulverpartikel der Pulver-Gas-Strömung für unterschiedliche Kornfraktionen, Pulvermassenströme sowie Förder- und Schutzgaseinstellungen vermessen. Mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Pulver-Gas-Strahls kann gezeigt werden, dass die Trajektorien der Partikel nach Verlassen der Düsenaustrittsöffnung geradlinig bis zum Kontakt mit dem Substrat verlaufen (vgl. Kap. 5.3). Das erlaubt eine explizite Darstellung der Partikeltrajektorien und -geschwindigkeiten auf Basis eines statistischen Modells. Die Laserleistungsdichteverteilung und Strahlkaustik wird mittels eines kamerabasierten Strahldiagnosesystems vermessen und anschließend auf Basis eines Super-Gauß-Ansatzes analytisch beschrieben. In Kap. 6 wird die Strahl-Stoff-Wechselwirkung numerisch simuliert. Die Ergebnisse sind der Trans-

missionsgrad der Pulver-Gas-Strömung, die Partikelerwärmung und die Temperaturverteilung im Grundwerkstoff sowie der Wärmeaustausch der Partikel mit der Substratoberfläche in Abhängigkeit der Einstellungen für die Pulverförderung (Pulverkornfraktion, Förder- und Schutzgas-Volumenstrom, Pulvermassenstrom), des Arbeitsabstandes, der Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit.

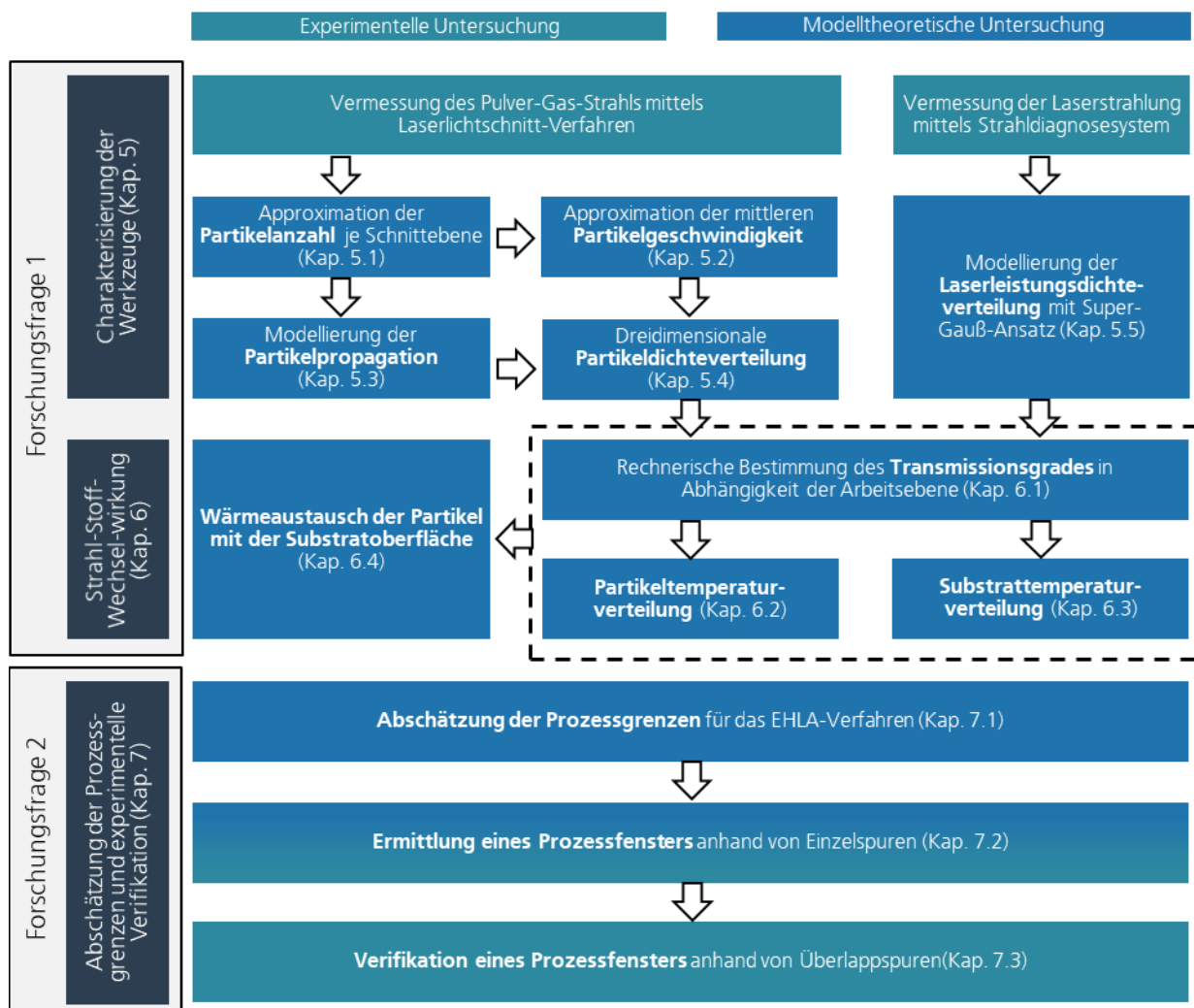


Bild 9 Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Untersuchung der Forschungsfragen

In Kap. 7.1 werden beispielhaft für einen Parametersatz und die verwendete Systemtechnik die Prozessgrenzen bzgl. der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit beim EHLA-Verfahren abgeleitet. Anhand des entwickelten Modells und der Ergebnisse zum Wärmeaustausch der Partikel mit der Substratoberfläche wird in Kap. 7.2 durch Anpassung der Laserleistung experimentell und modelltheore-

tisch ein Prozessfenster abgeleitet, bei dem die zur Verfügung gestellte Prozesswärme ausreicht, um bei Vorschubgeschwindigkeiten von 25 bis 200 m/min einen schmelzmetallurgischen Verbund zu erzeugen. Dazu wird die Spurbildung simuliert und mit stereolichtmikroskopischen Aufnahmen sowie Querschliffen auftragsgeschweißter Einzelspuren verglichen. Schließlich wird in Kap. 7.3 experimentell, anhand von metallographischen Querschliffen, ein Prozessfenster für Überlappspuren verifiziert, mit dem 10 bis 250 μm dünne defektfreie, schmelzmetallurgisch angebundene Schichten bei Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min hergestellt werden können.

Vorgehensweise

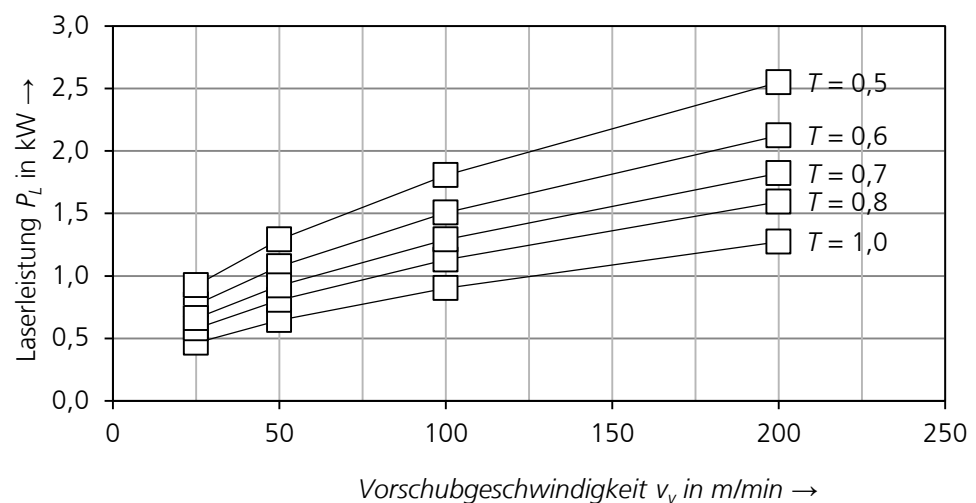
Die Eingrenzung der Verfahrensparameter des Versuchsplans erfolgt anhand der folgenden Annahmen, Abschätzungen und Vorversuche:

- Zur Untersuchung des Einflusses der Kornfraktion werden für die Untersuchungen kommerziell verfügbare Pulver aus 2.4856 in den Kornfraktionen $-45+11\ \mu\text{m}$ (KF1), $-53+20\ \mu\text{m}$ (KF2) und $-90+45\ \mu\text{m}$ (KF3) verwendet.
- Für eine kontinuierliche, pulsationsfreie Förderung des Zusatzwerkstoffs muss in Abhängigkeit des verwendeten Pulvers und des Pulvermassenstroms ein Mindest-Fördergas-Volumenstrom eingestellt werden, damit die sich drehende Nut der Pulverdosierring geleert und das Pulver vollständig gefördert wird. Bei der größtmöglichen Drehzahl der Pulverdosierring von $10\ \text{min}^{-1}$ kann für die verwendete Systemtechnik (vgl. Kap. 4.2) bei Fördergas-Volumenströmen $V_{FG} \geq 4\ \text{l/min}$ beobachtet werden, dass das Pulver mit den Kornfraktionen KF1-KF3 vollständig aus der Nut gefördert wird. Im Rahmen der Arbeit werden daher Fördergas-Volumenströme zwischen 4 l/min und 6 l/min untersucht.
- Für eine möglichst gleichmäßige Erwärmung der Partikel im Strahlengang soll der Pulver-Gas-Strahl in einem möglichst kleinen Bereich fokussiert werden. Die kleinsten Pulverfokusdurchmesser können mit coaxialen Pulverzufuhrdüsen erreicht werden (vgl. Kap. 2.1). Daher wird im Rahmen der Arbeit eine ILT-COAX 40-fein Pulverzufuhrdüse verwendet (vgl. Kap. 4.2).
- Die Spaltbreite zwischen Innen- und Außenkonus der verwendeten Koaxialdüse kann in Abhängigkeit der Kornfraktion und des Pulvermassenstroms eingestellt werden. Je größer die Kornfraktion und je größer der Pulvermassenstrom, desto größer muss auch die Spaltbreite gewählt werden, um ein Zusetzen des Ringraums zwischen Innen- und Außenkonus mit Pulverpartikeln zu vermeiden. Anhand von Vorversuchen mit der größten Kornfraktion KF3 und der größtmöglichen Drehzahl der Pulverdosierring von $U_P = 10\ \text{min}^{-1}$ wird für ein Spaltmaß von $179\ \mu\text{m}$ kein Zusetzen des Ringraums mehr beobachtet.
- Der Schutzgas-Volumenstrom muss hinreichend groß sein, um das Schweißgut ausreichend vor Oxidation zu schützen. Eine Vergrößerung des Volumensstromes darüber hinaus bietet sowohl unter wirtschaftlichen (Kosten) als auch unter technischen Gesichtspunkten (Verzerrung des Pulver-Gas-Strahls, Verschiebung der Pulverfokusposition) keine Vorteile. Im Rahmen der Arbeit

werden daher Schutzgas-Volumenströme im Bereich von 5 bis 15 l/min untersucht, bei denen im Rahmen von Voruntersuchungen für sämtliche Kornfraktionen optisch keine Verschiebung der Pulverfokusposition in einem Abstand von ca. 7 bis 8 mm unterhalb der Düsenaustrittsöffnung beobachtet werden konnte.

- Das Pulver soll gemäß der Prozessführung beim EHLA-Verfahren oberhalb des Schmelzbades aufgeschmolzen werden. Daher werden Arbeitsabstände z , die größer oder gleich der Pulverfokusposition sind, d. h. zwischen 7 bis 9 mm unterhalb der Düsenaustrittsöffnung untersucht (vgl. Kap. 4.5), d. h. $-9 \text{ mm} \leq z \leq -7 \text{ mm}$.
- Damit ein Großteil der Partikel im Strahlengang aufgeschmolzen wird, ist es erforderlich, dass der Strahldurchmesser d_L den Durchmesser des Pulver-Gas-Strahls d_P im Wechselwirkungsvolumen vollständig überdeckt, d. h. $d_L > d_P$. Bei der im Rahmen der Arbeit verwendeten coaxialen Pulverzufuhrdüse beträgt der Pulverfokusdurchmesser nahezu unabhängig von den gewählten Einstellungen für die Pulverförderung $d_P \approx 1 \text{ mm}$. Der Laserstrahldurchmesser wird daher auf $d_L = 1,13 \text{ mm}$, in einem Arbeitsabstand von $z = -8 \text{ mm}$ festgelegt (vgl. Kap. 4.3 und Kap. 5.4).
- Zur Eingrenzung der zu untersuchenden Laserleistungen werden unter Annahme einer gaußförmigen Laserstrahlungsintensitätsverteilung die mindestens zum Aufschmelzen des Substrates erforderlichen einzustrahlenden Laserleistungen P_L in Abhängigkeit des Transmissionsgrades und des Strahldurchmessers für einen Absorptionsgrad von $A = 0,4$ abgeschätzt [54],[112]. In Bild 10 sind die einzustrahlenden Laserleistungen P_L zur Erreichung der Schmelztemperatur an der Substratoberfläche für Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min für Transmissionsgrade T von $T = 1,0$ bis $T = 0,5$ für den verwendeten Strahldurchmesser von $d_L = 1,13 \text{ mm}$ aufgetragen. Im Rahmen der Arbeit werden daher Laserleistungen zwischen 500 W und 2500 W untersucht.

Bild 10
Erforderliche einzustrahlende Laserleistung P_L zum Aufschmelzen des Substrates in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_v für die Transmissionsgrade zwischen $T = 1,0$ und $T = 0,5$.
 $d_L = 1,13 \text{ mm}$



- Für eine angestrebte Flächenrate von bis zu 500 cm²/min und untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min wird im Rahmen der Arbeit ein konstanter Spurversatz von 0,25 mm gewählt.
- Bei der angestrebten Flächenrate und den erforderlichen Schichtdicken zwischen 10 µm und 250 µm lässt sich ein Bereich für den Pulvermassenstrom im Bereich von 5 bis 25 g/min abschätzen.

Die untersuchten Verfahrensparameterbereiche sind zusammenfassend in Tabelle 2 dargestellt. Dabei wird ausgehend von dem blau hervorgehobenen Referenzparametersatz unifaktoriell (zeilenweise) ein Verfahrensparameter variiert, während die weiteren Verfahrensparameter konstant sind.

Verfahrensparameter	Wert				
Kornfraktion KF [µm]	-45+11(KF1)		-53+20 (KF2)	-90+45 (KF3)	
Pulvermassenstrom $\dot{m}_p$ [g/min]	5	10	15	20	25
Fördergas-Volumenstrom V_{FG} [l/min]	4		5	6	
Schutzgas-Volumenstrom V_{SG} [l/min]	5		10	15	
Laserleistung P_L [kW]	0,5	1	1,5	2	2,5
Arbeitsabstand z [mm]	-7,0	-7,5	-8,0	-8,5	-9,0
Vorschubgeschwindigkeit v_v [m/min]	25	50	100	200	

Tabelle 2 Im Rahmen der Arbeit untersuchte Verfahrensparameterbereiche. Blau: Referenzparametersatz

4 Verwendete Maschinen- und Systemtechnik

4.1 Werkstoffe

Als Zusatzwerkstoff wird die Nickelbasis-Superlegierung Werkstoff-Nr. 2.4856 (Handelsname: Inconel 625) verwendet. 2.4856 ist eine nichtmagnetische, mischkristallhärtende, kubisch-flächenzentrierte NiCrMo-Legierung, die sich durch eine große Beständigkeit gegenüber einer Vielzahl oxidativer und korrosiver Medien auszeichnet. Aufgrund dieser Eigenschaften wird 2.4856 als Beschichtungswerkstoff für zahlreiche Anwendungen in diversen Branchen wie bspw. dem maritimen Sektor, der Offshore- oder der chemischen Industrie eingesetzt. Für die Untersuchungen wurden drei kommerziell verfügbare Pulver (Firma: Oerlikon Metco AG) in unterschiedlichen Kornfraktionen ausgewählt:

- Kornfraktion 1, KF1: -45 + 11 µm (Handelsname: Diamalloy 1005)
- Kornfraktion 2, KF2: -53 + 20 µm (Handelsname: MetcoClad 625F)
- Kornfraktion 3, KF3: -90 + 45 µm (Handelsname: Amdry 625)

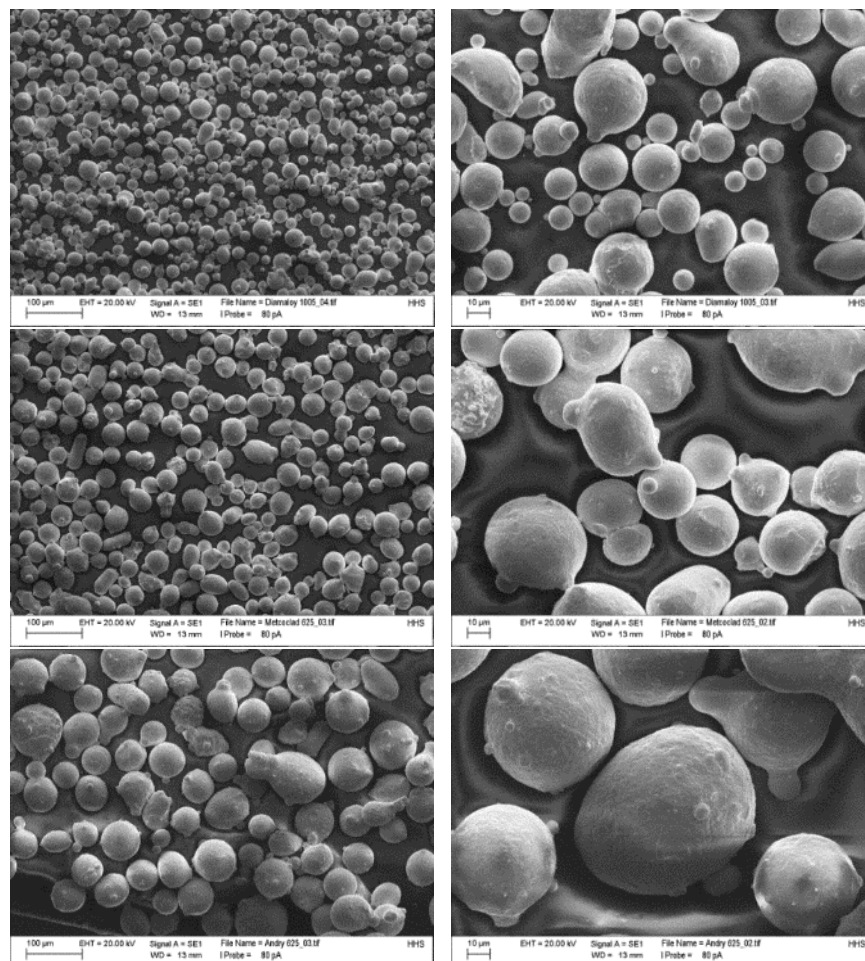
Die chemische Zusammensetzung wurde mittels optischer Emissionsspektrometrie (Inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES) gemessen. Die Ergebnisse der chemischen Analyse der Pulverwerkstoffe sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3
Chemische Zusammensetzung der Pulverwerkstoffe Kornfraktion 1 bis 3 und nominelle chemische Zusammensetzung von 2.4856

Legierungselement- gehalt [Gew.-%]	KF1	KF2	KF3	IN625	
				Min.	Max.
Ni	65,01	61,1	61,09	-	58
Cr	21,4	21,6	21,7	20,0	23,0
Fe	0,8	4,1	4,0	-	5,0
Mo	9,0	8,8	8,88	8,0	10,0
Nb + Ta	3,57	3,98	3,93	3,15	4,15
C	-	-	-	-	0,1
Mn	< 0,01	0,0	0,02	-	0,5
Si	0,12	0,2	0,06	-	0,5
P	-	-	-	-	0,015
S	-	-	-	-	0,015
Al	-	-	-	-	0,4
Ti	-	-	-	-	0,4
Co	0,1	0,0	0,06	-	1,0

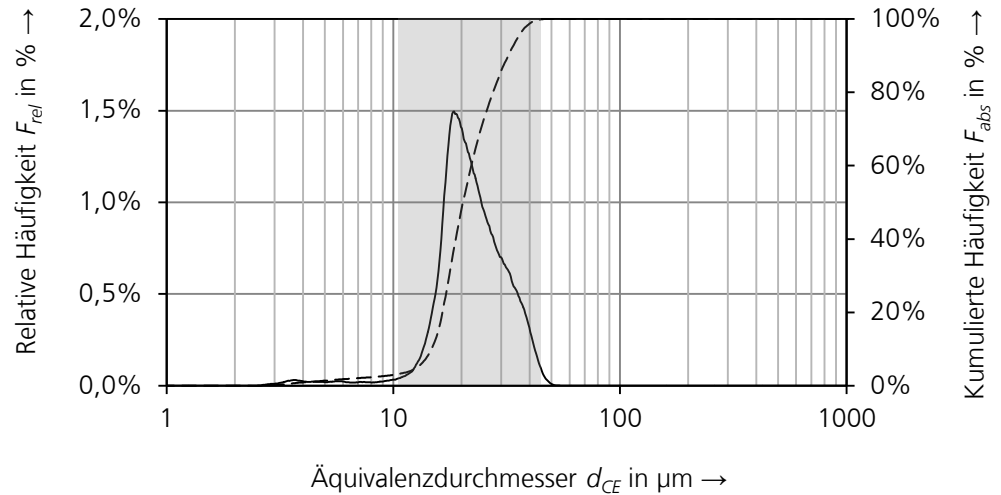
Die Legierungselementgehalte sämtlicher Pulverwerkstoffe liegen innerhalb der Herstellerspezifikation von 2.4856. Im Vergleich zu den übrigen Pulverwerkstoffen kann bei KF1 ein um ca. 3 % geringerer Eisengehalt und ein ca. 0,3 % geringerer kombinierter Niob-Tantal-Gehalt gemessen werden. Die Morphologie der Pulverwerkstoffe wurde rasterelektronenmikroskopisch untersucht. In Bild 11 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der drei Pulverwerkstoffe KF1 (oben), KF2 (Mitte) und KF3 (unten) abgebildet.

Bild 11
Rasterelektronen-
mikroskopische Auf-
nahmen der Pulver-
werkstoffe
Oben: KF1 mit Korn-
fraktion:
-45 +11 μm .
Mitte: KF2 mit
Kornfraktion
-53 +20 μm
Unten: KF3 mit
Kornfraktion
-90 +45 μm .

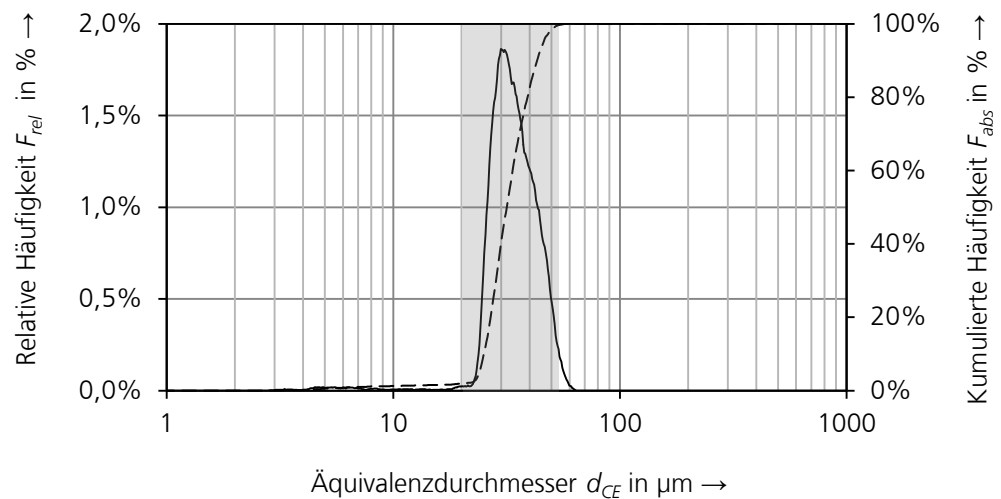


Die Pulverpartikel sind überwiegend sphärisch. An der Oberfläche, insbesondere bei Pulver KF3, sind vereinzelt Satelliten zu erkennen, die bei der Herstellung des Pulvers durch Gasverdüsen entstehen. Die Korngrößenverteilung wurde mittels statistischer Bildanalyse bei 20-facher Vergrößerung gemessen (Morphologi G3, Malvern Panalytical GmbH). In Bild 12 sind die gemessenen relativen F_{rel} und kumulierten anzahlgewichteten Häufigkeitsverteilungen F_{abs} über dem Äquivalenzdurchmesser d_{CE} für KF1-KF3 dargestellt. Die mittleren Korndurchmesser liegen bei KF1 bei ca. 25 μm , bei KF2 etwa bei 35 μm und bei KF3 bei rund 69 μm .

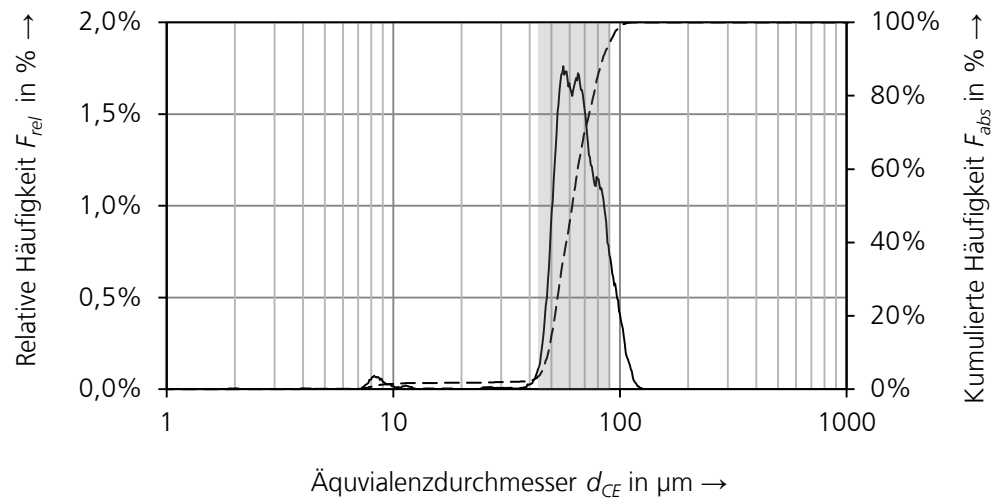
Bild 12
Relative F_{rel} und
kumulative F_{abs} an-
zahlgewichtete
Häufigkeitsvertei-
lung über dem
Äquivalenzdurch-
messer d_{CE} .
Grauer Kasten:
Herstellerspezifika-
tion.
KF1 mit Kornfrak-
tion:
-45 +11 μm
Mittlerer Korn-
durchmesser:
24,92 μm



KF2 mit Kornfrak-
tion
-53 +20 μm
Mittlerer Korn-
durchmesser:
35,28 μm



KF3 mit Kornfrak-
tion
-90 +45 μm
Mittlerer Korn-
durchmesser:
68,91 μm



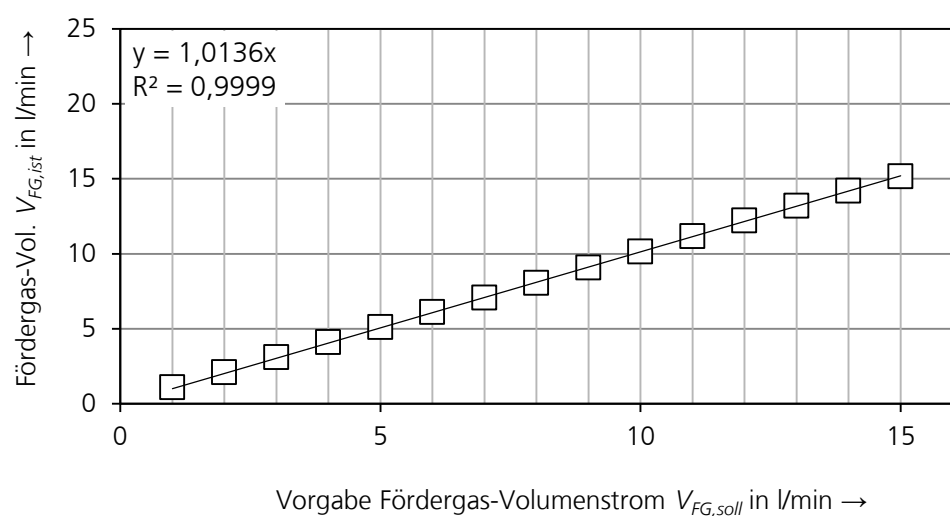
Entsprechend der anzahlgewichteten Quantile liegen bei KF1 ca. 95,6 %, bei KF2 ca. 96,5 % und bei KF3 ca. 87,8 % der gemessenen Partikeldurchmesser innerhalb der Herstellerspezifikation. Als Grundwerkstoff für die experimentellen Untersuchungen werden geschliffene, zylindrische, austenitische, rostfreie Stahllwellen aus 1.4301 mit einem Durchmesser von 40 mm verwendet.

4.2 Pulverförderung und Pulverzufuhrdüse

Pulverförderung

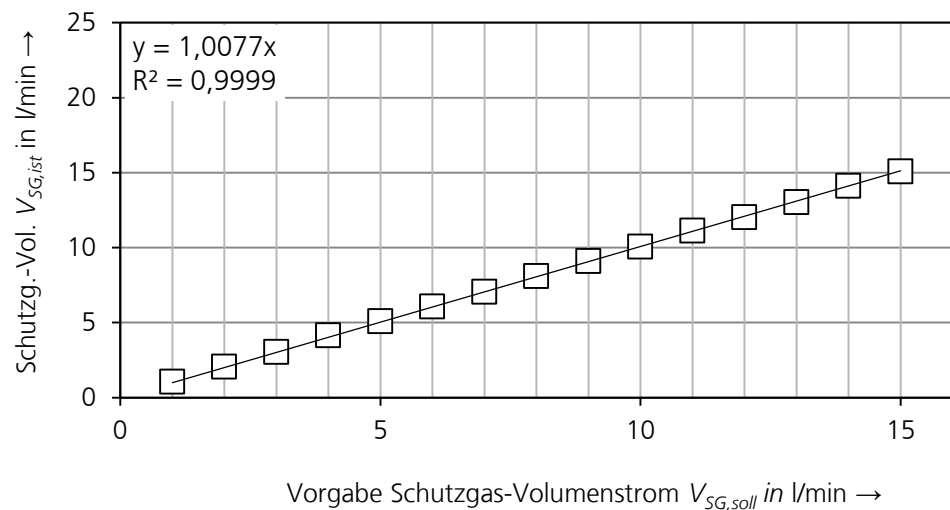
Zur Pulverförderung wurde ein pneumatischer Pulverförderer (Firma: GTV Verschleißschutz GmbH, Typ: PF2/2, Nutgröße der Dosierscheibe (T x B): 0,6 mm x 5 mm) verwendet. Der Fördergas-Volumenstrom wurde durch einen im Pulverförderer integrierten elektrischen Massendurchflussregler geregelt (Firma: Bronkhorst Mättig GmbH, Typ: GTV 108). Der Schutzgas-Volumenstrom wurde mittels eines thermischen Massendurchflussreglers (Firma Voigtlin Instruments AG, Typ: GCR-C9SA-BA30) variiert. Als Förder- und Schutzgas wurde in allen Experimenten Argon mit einem Vordruck von 4 bar verwendet. Die Förder- und Schutzgas-Volumenströme wurde mit einem elektrischen Massendurchflussmesser (Firma Kobold Messring GmbH, Typ: DMS-112K2FD25L) gemessen. In Bild 13 ist das Ergebnis der Messung des Fördergas-Volumenstroms $V_{FG,ist}$ über dem am Pulverförderer eingestellten Wert $V_{FG,soll}$ zwischen 1 l/min und 15 l/min abgebildet. Jeder Messpunkt stellt den arithmetischen Mittelwert von jeweils drei Messungen dar. Ferner ist die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmte Geradengleichung für den Förder-Gas-Volumenstrom in Abhängigkeit des am Pulverförderer vorgegebenen Wertes dargestellt. Da bei einer Vorgabe von 0 l/min kein Gas gefördert werden kann, wird der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der Abszisse auf 0 g/min festgelegt.

Bild 13
Gemessener Fördergas-Volumenstrom $V_{FG,ist}$ in Abhängigkeit der am Pulverförderer eingestellten Werte $V_{FG,soll}$



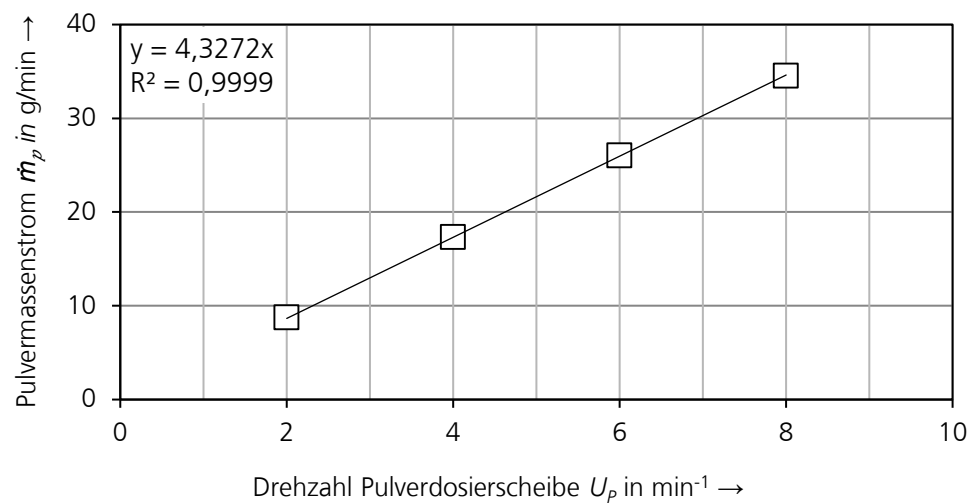
Die größte absolute Standardabweichung beträgt maximal ca. 0,03 l/min, die größte relative Standardabweichung beträgt 0,37 %. In Bild 14 ist das Ergebnis der Messung des Schutzgas-Volumenstroms $V_{SG,ist}$ gegenüber dem am Schutzgas-Massendurchflussregler eingestellten Wert $V_{SG,soll}$ zwischen 1 l/min und 15 l/min dargestellt. Jeder Messpunkt entspricht dem arithmetischen Mittelwert aus drei Messungen. Analog zum Vorgehen bei der Messung des Fördergas-Volumenstroms ist die Geradengleichung angegeben. Die größte absolute Standardabweichung beträgt maximal ca. 0,07 l/min, die größte relative Standardabweichung beträgt 0,95 %.

Bild 14
Gemessener Schutzgas-Volumenstrom $V_{SG,ist}$ in Abhängigkeit der am Massendurchflussregler eingestellten Werte $V_{SG,soll}$

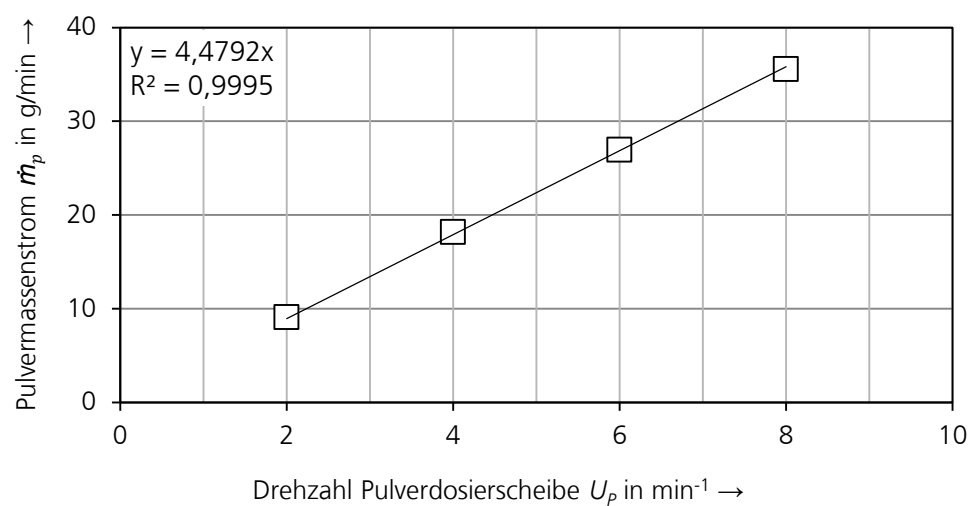


Der Pulvermassenstrom wurde für jede Pulverkornfraktion durch Wiegen der binnen einer Minute geförderten Pulvermenge mittels einer Präzisionswaage (Firma: PCE GmbH, Typ: LSM 200, Reproduzierbarkeit 0,01 g) gravimetrisch gemessen. In Bild 15 sind die Ergebnisse der Pulvermassenstrommessungen $\dot{m}_p$ für eine Variation der Drehzahl U_p der Pulverdosierscheibe von 2 bis 8 min⁻¹ für die Pulverwerkstoffe KF1 (oben), KF2 (Mitte), KF3 (unten) bei einem Fördergas-Volumenstrom von $V_{FG} = 5$ l/min dargestellt. Die Datenpunkte sind arithmetische Mittelwerte von jeweils drei Messungen. Analog zur Bestimmung der Geradengleichungen von Förder- und Schutzgasvolumenstrom sind jeweils die Geradengleichungen für den Pulvermassenstrom in Abhängigkeit der Drehzahl angegeben. Die größte absolute Standardabweichung beträgt 0,28 g/min (KF3 bei einer Drehzahl von $U_p = 8$ min⁻¹). Die größte relative Standardabweichung beträgt maximal ca. 0,96 % (KF 3 bei einer Drehzahl von $U_p = 2$ min⁻¹).

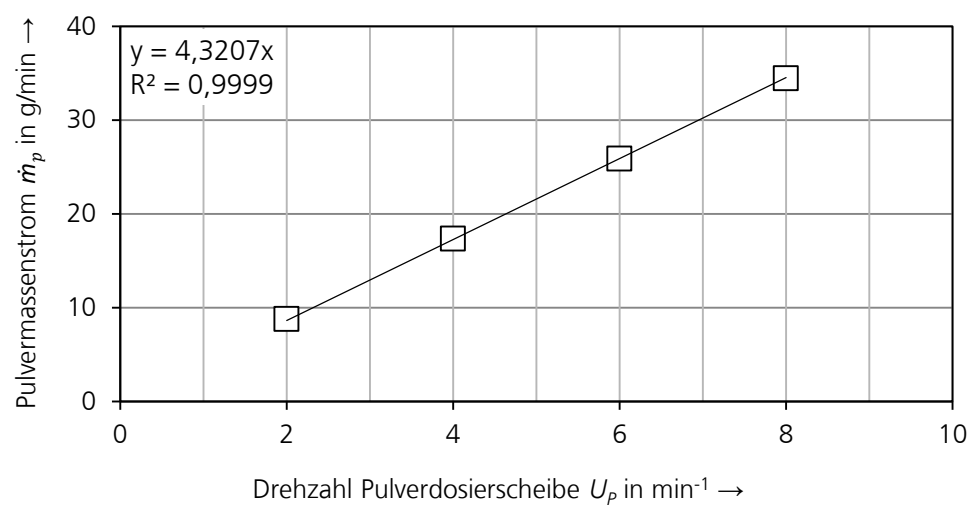
Bild 15
Gemessener Pul-
vermassenstrom
 $\dot{m}_p$ in Abhangig-
keit der Drehzahl
der Pulverdosier-
scheibe U_p
KF1 mit Kornfrak-
tion:
-45 +11 μm



KF2 mit Kornfrak-
tion:
-53 +20 μm



KF3 mit Kornfrak-
tion:
-90 +45 μm



Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Pulverkornfraktionen KF1 bis KF3 Pulvermassenströme zwischen 5 g/min und 25 g/min in Schritten von 5 g/min untersucht. Damit konnten die erforderlichen Drehzahlen der Pulverdosierteiche U_P gemäß Tabelle 4, gerundet auf zwei Stellen, anhand der Regressionsgleichungen berechnet werden.

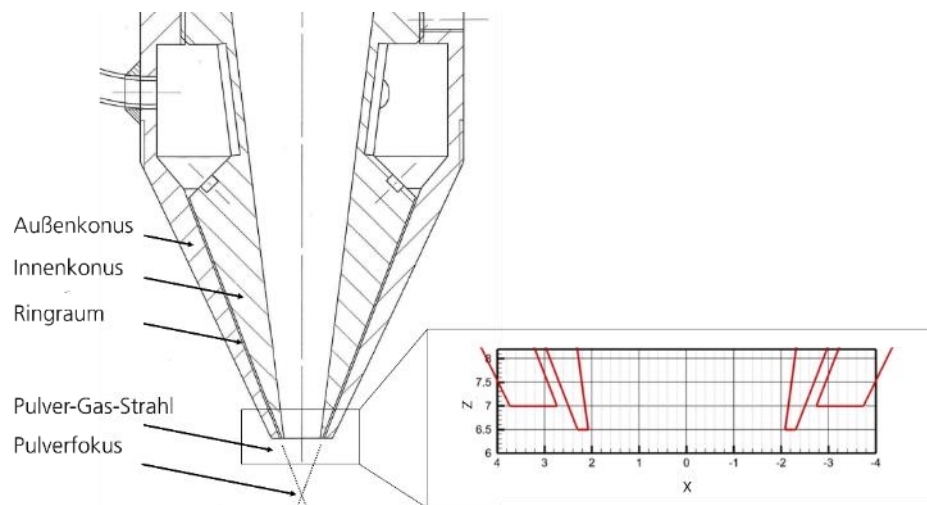
Tabelle 4
Pulvermassenstrom $\dot{m}_p$ in Abhängigkeit der Drehzahl der Pulverdosierteiche U_P für Pulvermassenströme von 5 bis 25 g/min

Pulvermassenstrom $\dot{m}_p$ in g/min	Drehzahl Dosierscheibe U_P in min^{-1}		
	KF1	KF2	KF3
5	1,16	1,12	1,16
10	2,31	2,23	2,31
15	3,47	3,35	3,47
20	4,62	4,47	4,63
25	8,09	7,81	8,10

Pulverzufuhrdüse

Für die Untersuchungen wurde eine ILT-COAX 40-fein-Pulverzufuhrdüse verwendet. Bei dieser Düse wird der Pulver-Gas-Strahl durch einen Pulverteiler in drei Teilstrahlen aufgeteilt und in den Ringraum zwischen einem Innen- und einem Außenkonus gefördert. Dabei prallen die Pulverpartikel gegen die Innenkonusfläche und strömen mit dem Fördergas in Richtung Düsenspitze. Durch eine solche Pulverzufuhrdüse wird ein Pulver-Gas-Hohlkegel erzeugt, wobei die Spitze des Kegels jener Bereich ist, auf den der Pulver-Gas-Strahl fokussiert wird (Pulverfokus). In Bild 16 ist der Aufbau der verwendeten Koaxialdüse schematisch abgebildet. Die Spaltbreite des Ringraums kann durch Verdrehung der beiden ineinander geschraubten Konen der Koaxial-Pulverzufuhrdüse angepasst werden (Gewindesteigung 1 mm, Spitzenwinkel der Konen zur Normalen: 21°). Für die Untersuchungen wurde ein Winkelversatz von 180° gewählt. Damit beträgt die Spaltbreite des Ringraums in Strömungsrichtung etwa $179 \mu\text{m}$ (siehe Bild 16).

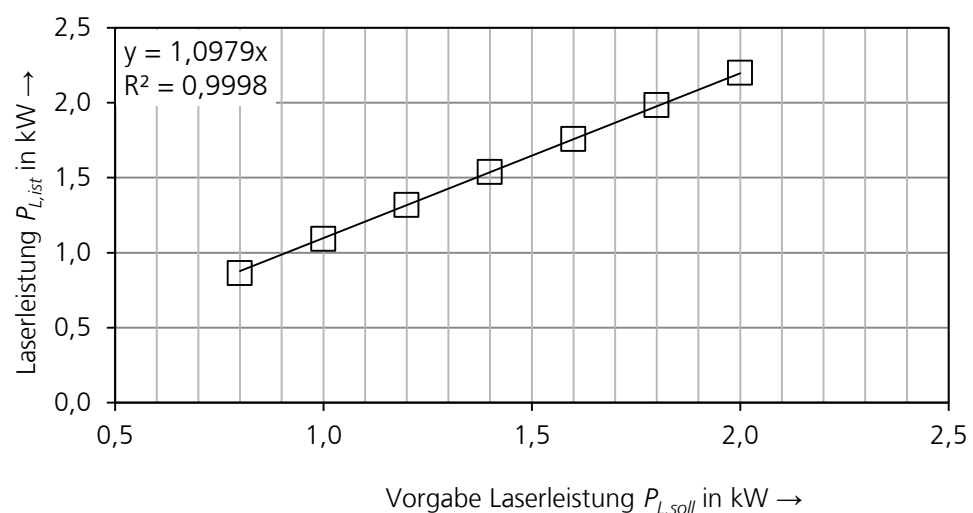
Bild 16
Schematische Darstellung der Pulverzufuhrdüse und des Ringraums zwischen Innen- und Außenkonus bei der kontinuierlichen koaxialen Pulverzufuhrdüse ILT-COAX 40-fein



4.3 Laserstrahlquelle und Optik

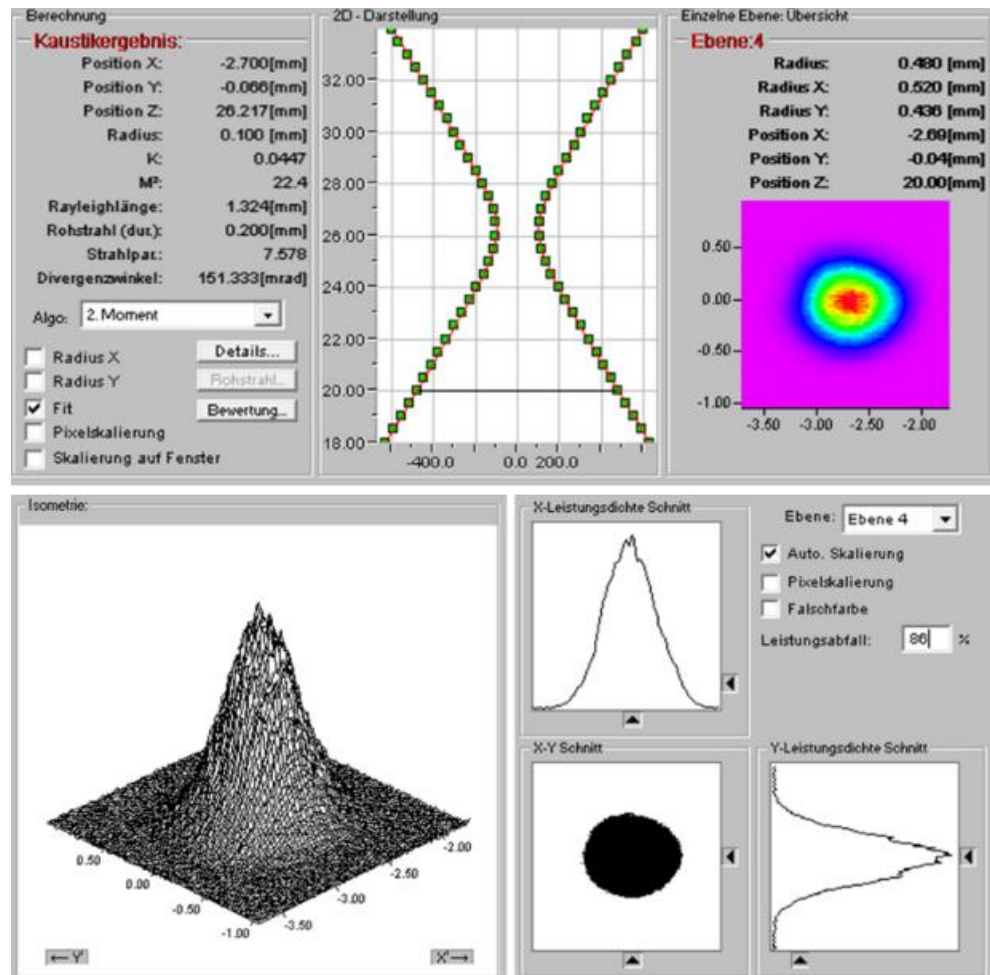
Als Laserstrahlquelle wurde ein diodengepumpter Faserlaser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1.085 \pm 15 \text{ nm}$, einer Strahlqualität von $8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ und einer maximalen Laserleistung von 4 kW verwendet (Firma Laserline GmbH, Typ: LDF 4000-8). Die Laserleistung wurde mit einem Laserleistungsmessgerät mit kalorimetrischem Messprinzip (Firma: Primes GmbH, Typ: CompactPowerMonitor CPM-10) nach Austritt aus der Bearbeitungsoptik gemessen. In Bild 17 ist das Ergebnis der Laserleistungsmessung für einen Bereich von $0,8$ bis 2 kW aufgetragen. Jeder Messpunkt entspricht dem arithmetischen Mittelwert aus drei Messungen. Ferner ist die fehlerquadratminimale Geradengleichung für die Laserleistung $P_{L,ist}$ in Abhängigkeit der an der Strahlquelle eingestellten Werte $P_{L,soll}$ abgebildet. Die größte absolute Standardabweichung beträgt $1,7 \text{ W}$ (bei einer eingestellten Laserleistung von $1,2 \text{ kW}$). Die größte relative Standardabweichung beträgt maximal ca. $0,13 \%$ (bei $0,8 \text{ kW}$).

Bild 17
Gemessene Laserleistung $P_{L,ist}$ gegenüber den an der Strahlquelle eingestellten Werten $P_{L,soll}$



Durch den Einsatz eines Lichtleitkabels mit einem Faserkerndurchmesser von $200 \mu\text{m}$ [NA 0,1] und Verwendung einer modularen Schweißoptik (Firma Laserline GmbH, Typ: OTS-5, Brennweite Fokussierlinse: 200 mm , Brennweite Kollimation: 200 mm) mit einem Abbildungsverhältnis von 1:1 beträgt der minimal einsetzbare Laserstrahldurchmesser ca. $200 \mu\text{m}$. Die Laserleistungsdichteverteilung wurde mit einem kamerabasierten Strahldiagnosesystem (Firma: Primes GmbH, Typ: FocusMonitor FM120-HP, Detektortyp: DFY-5, Pinhole: $18 \mu\text{m}$) vermessen. Für die durchgeführten Versuche wurde die Laserstrahlung so defokussiert, dass der Laserstrahldurchmesser bei einem Arbeitsabstand von $z = -8 \text{ mm}$ auf der Werkstückoberfläche ca. $d_L = 1,13 \text{ mm}$ beträgt. In Bild 18 sind die über fünf Messungen gemittelte Strahlkaustik sowie die Laserleistungsdichteverteilung bei einem Strahldurchmesser von $d_L \approx 1 \text{ mm}$ unten dargestellt.

Bild 18
Oben: über fünf
Messungen gemittelte Laserstrahl-
kaustik. Unten: La-
serleistungsdichte-
verteilung im Ar-
beitspunkt



4.4 Handhabungssystem

Im Fokus der Entwicklungen des EHLA-Verfahrens stehen rotationssymmetrische Bauteile für z. B. die Anwendungsbereiche Wellen, Zylinder oder PKW-Bremscheiben. Die großen erforderlichen Vorschubgeschwindigkeiten (25 bis 200 m/min entsprechen bei einem Außendurchmesser von 40 mm Drehzahlen von etwa 199 bis 1592 min⁻¹) werden durch Rotation der Komponenten realisiert. Um große Wellen auch bei großen Drehzahlen (> 1000 min⁻¹) beschichten zu können, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Hornet Laser Cladding B.V. eine industrietaugliche Hochgeschwindigkeits-Lasermaterialbearbeitungsmaschine ausgelegt und aufgebaut. Ausgangspunkt war eine konventionelle Drehmaschine, bei der die mechanischen Getriebe entfernt und durch CNC-gesteuerte Servomotoren ersetzt werden (siehe Bild 19). Ebenfalls an die CNC-Steuerung angebunden sind zwei Linearachsen zur Bewegung der Bearbeitungsoptik in x- und z-Richtung. Eine Stellschraube ermöglicht die stufenlose Justage in y-Richtung. Den Anforderungen an Lasersicherheit wurde durch eine vollständige

Laserschutz-Einhausung Rechnung getragen. Mit der entwickelten Maschine können Komponenten mit einem Durchmesser von bis zu 300 mm und einer Länge von bis zu 1500 mm mit einer stufenlos regelbaren Rotationsgeschwindigkeit von bis zu 2000 min^{-1} bearbeitet werden. Die Steuerung der Peripherie-Geräte, der Strahlquelle und dem Pulverförderer, und damit der wesentlichen Verfahrensparameter wie Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit, Pulvermassenstrom, Gas-Volumenströme etc. erfolgt über eine zentrale CNC-Bedienkonsole mit der gleichzeitig auf zwei Monitoren einerseits der Innenraum, andererseits koaxial das Schmelzbad beobachtet werden können.

Bild 19
Schematische Darstellung der EHLA-Lasermaterialbearbeitungsmaschine

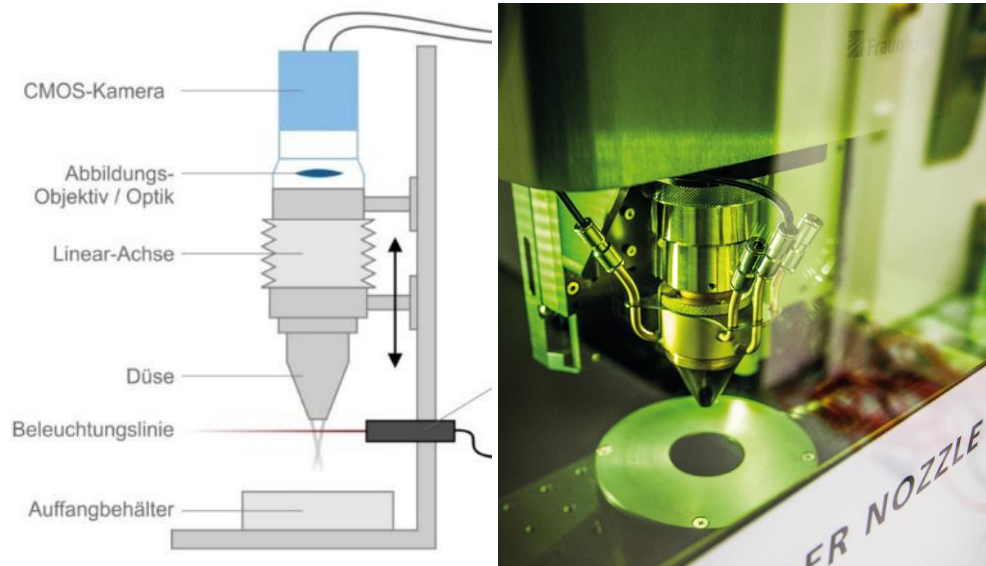


4.5 Pulver-Gas-Strahl-Charakterisierung

Die messtechnische Charakterisierung der Pulverpartikeldichteverteilung erfolgte durch ein am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT entwickeltes Analysegerät mittels Laserlichtschnittverfahren [111]. Dazu wurde der Pulver-Gas-Strahl seitlich durch eine am Fraunhofer ILT entwickelte gepulste Laserstrahlquelle mit einer Wellenlänge von 810 nm beleuchtet. Die Formung der Beleuchtungs-Laserstrahlung erfolgte durch entsprechende optische Komponenten, sodass die Höhe der Beleuchtungslinie in z-Richtung ca. 0,26 mm betrug. Koaxial zur Pulverzufuhrdüse ist eine Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Mikrotron GmbH angebracht (High Sensitivity High Speed CMOS Camera, Typ: MC 1362). Der Messbereich der verwendeten Kamera beträgt 256×256 Pixel bei einer Auflösung von 50 px/mm , respektive ist die Pixelgröße ca. $19,53 \text{ }\mu\text{m}$. Die gepulste Beleuchtung mit einer Pulsdauer von 0,008 ms ermöglicht die präzise Bestimmung der Pulverpartikelposition und die Vermeidung von Leuchtspuren entlang der Partikeltrajektorie infolge der Bewegungsunschärfe. In Bild 20 ist der Aufbau schematisch links abgebildet und rechts fotografisch das Messgerät zur Vermessung des Pulver-Gas-Strahls abgebildet.

Bild 20

Links: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Vermessung des Pulver-Gas-Strahls mittels Laserlichtschnittverfahren. Rechts: Foto des Messgerätes



Durch eine Bildrate von 1000 Bildern pro Sekunde können die Pulverpartikel zu einem definierten Zeitpunkt in Anzahl und Position in der jeweiligen Ebene fotografisch erfasst werden. Die Pulverzufuhrdüse wurde relativ zur linienförmigen Laserstrahlung geführt und jeweils 3 Sekunden fotografiert. Das Ergebnis sind 3000 Einzelaufnahmen je Ebene mit Grauwerten von 0 bis 255 für jedes Pixel des Kamerachips. In Bild 21 sind exemplarisch Einzelaufnahmen der jeweiligen Ebenen mit einem Abstand von 2 mm (E2) bis 11 mm (E11) von der Düsen Spitze für einen Pulvermassenstrom von 5 g/min dargestellt.

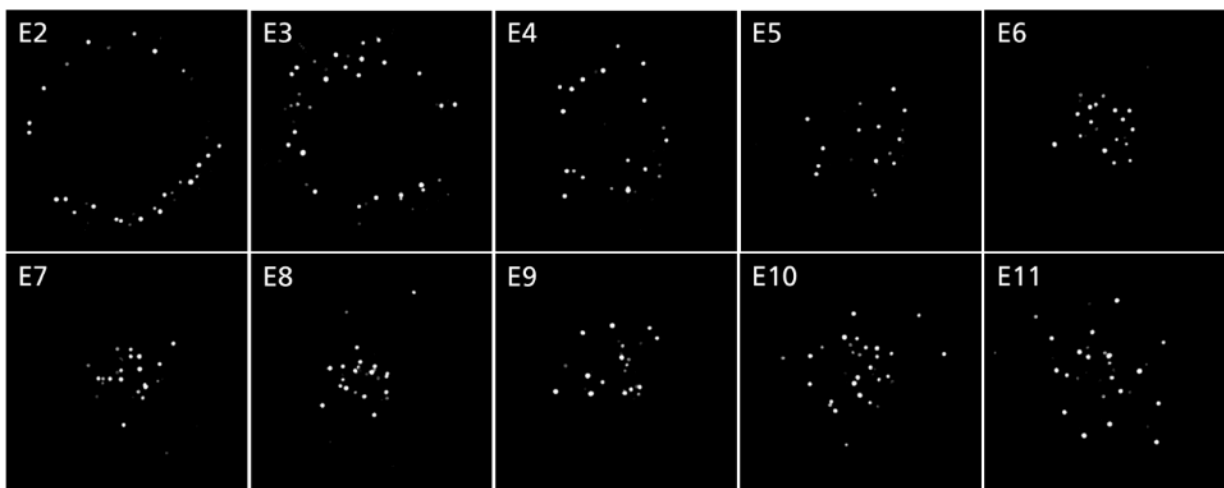


Bild 21 Ausgewählte Einzelaufnahmen der Vermessung des Pulver-Gas-Strahls bei einem Abstand von 2 mm (E2) bis 11 mm (E11). Pulverdüse ILT-COAX40-fein. Parameter: KF2, Pulvermassenstrom 5 g/min, Fördergas-Volumenstrom 5 l/min, Schutzgas-Volumenstrom: 10 l/min

Durch Überlagerung der 3000 Einzelaufnahmen je Ebene wird die ringförmige Verteilung des Pulvers sichtbar (siehe Bild 22). Unterhalb des Pulverfokus, etwa zwischen E7 und E8, ist die Pulververteilung nicht mehr ringförmig. Auf Basis der mittleren Anzahl der Partikel im ausgeleuchteten Bereich kann bei bekanntem Pulvermassenstrom, bekannter Pulverkornfraktion und bekannter Beleuchtungslinien-Höhe in z-Richtung die Geschwindigkeit der Pulverpartikel rechnerisch approximiert werden (s. Kap. 5.2).

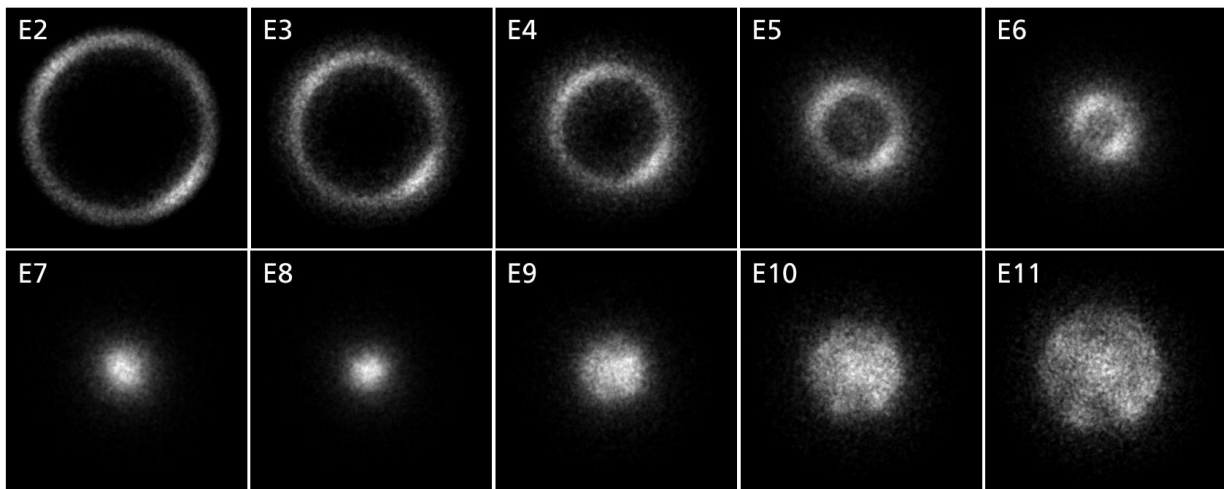


Bild 22 Je 3000 überlagerte Einzelbilder der Vermessung des Pulver-Gas-Strahls bei einem Abstand von 2 mm (E2) bis 11 mm (E11). Pulverdüse ILT-COAX40-fein. Parameter: KF2, $\dot{m}_p = 5 \text{ g/min}$, $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$, $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$

5 Charakterisierung der Werkzeuge

5.1 Pulverpartikelanzahl

Mit Hilfe quantitativer Bildanalyse kann die Anzahl und Position der Partikel je Einzelbild (vgl. Bild 21) bestimmt werden. Dabei wurden bzgl. des Schwellwertes für einen Grauwert zusammenhängende Bereiche jeweils als ein Partikel identifiziert. In Bild 23 ist exemplarisch die Partikelidentifikation auf Basis eines Schwellwertes für den Grauwert für je drei Einzelbilder der Ebenen E3 bis E6 bei einem Pulvermassenstrom von 5 g/min und KF2 dargestellt. Durch die konische Ausführung der Pulverzufühdüse wird die Ausdehnung der ringförmigen Partikeldichte am Düsenausgang bis zum Erreichen des Pulverfokus zunehmend verkleinert und die Partikeldichte wird mit wachsendem Abstand zur Pulverdusenöffnung kontinuierlich größer. Je größer die Partikeldichte, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Projektionen zweier oder mehr Partikel in der x-y-Ebene innerhalb der z-Messebene überlagern und desto weniger Partikel können einzeln identifiziert werden bzw. desto mehr Partikel werden fälschlicherweise als ein Partikel identifiziert (Partikel-Partikel-Abschattung). Weitere Einflussfaktoren auf die Partikeldichte respektive die gemessene Partikelanzahl innerhalb eines Einzelbildes bei dieser Messmethode sind:

- Höhe der Beleuchtungslinie bzw. der Messebene (hier: 0,26 mm): Je größer die Höhe der Beleuchtungslinie in z-Richtung, desto größer ist die Anzahl der gleichzeitig beleuchteten Partikel und infolge die Partikelanzahlen innerhalb der Messebene.
- Belichtungszeit: Je größer die Belichtungszeit (hier: 0,008 ms), desto größer ist die Bewegungsunschärfe infolge von Leuchtpuren, wodurch weniger Partikel identifiziert werden können.
- Auflösung des Kamerachips: Je größer die Auflösung des Kamerachips (hier: 19,83 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$) desto eher können nicht zusammenhängende Bereiche als einzelne Partikel identifiziert werden.
- Abstand der Messebene zur Pulverfokusebene: Je geringer der Abstand der Messebene zur Pulverfokusebene, desto größer sind die Partikeldichten infolge der Abnahme der Pulver-Gas-Strahlquerschnittsfläche und somit die gemessenen Partikelanzahlen innerhalb der Messebene.
- Kornfraktion: Je kleiner die Kornfraktion, desto größer die Partikelanzahlen bei gleichem Pulvermassenstrom aufgrund der Proportionalität zu $\propto 1/r_p^3$ und desto weniger Partikel können einzeln identifiziert werden.
- Partikelgeschwindigkeit: Je geringer die Partikelgeschwindigkeit, desto größer die Anzahl gleichzeitig beleuchteter Partikel respektive Partikelanzahlen.
- Pulvermassenstrom: Je größer der Pulvermassenstrom, desto größer sind bei gleicher Pulverkornfraktion die Partikelanzahlen in der Messebene.

Bild 23
Schematische Darstellung der Partikelidentifikation je Einzelbild auf Basis eines Schwellwertes für den Grauwert der Einzelbilder.

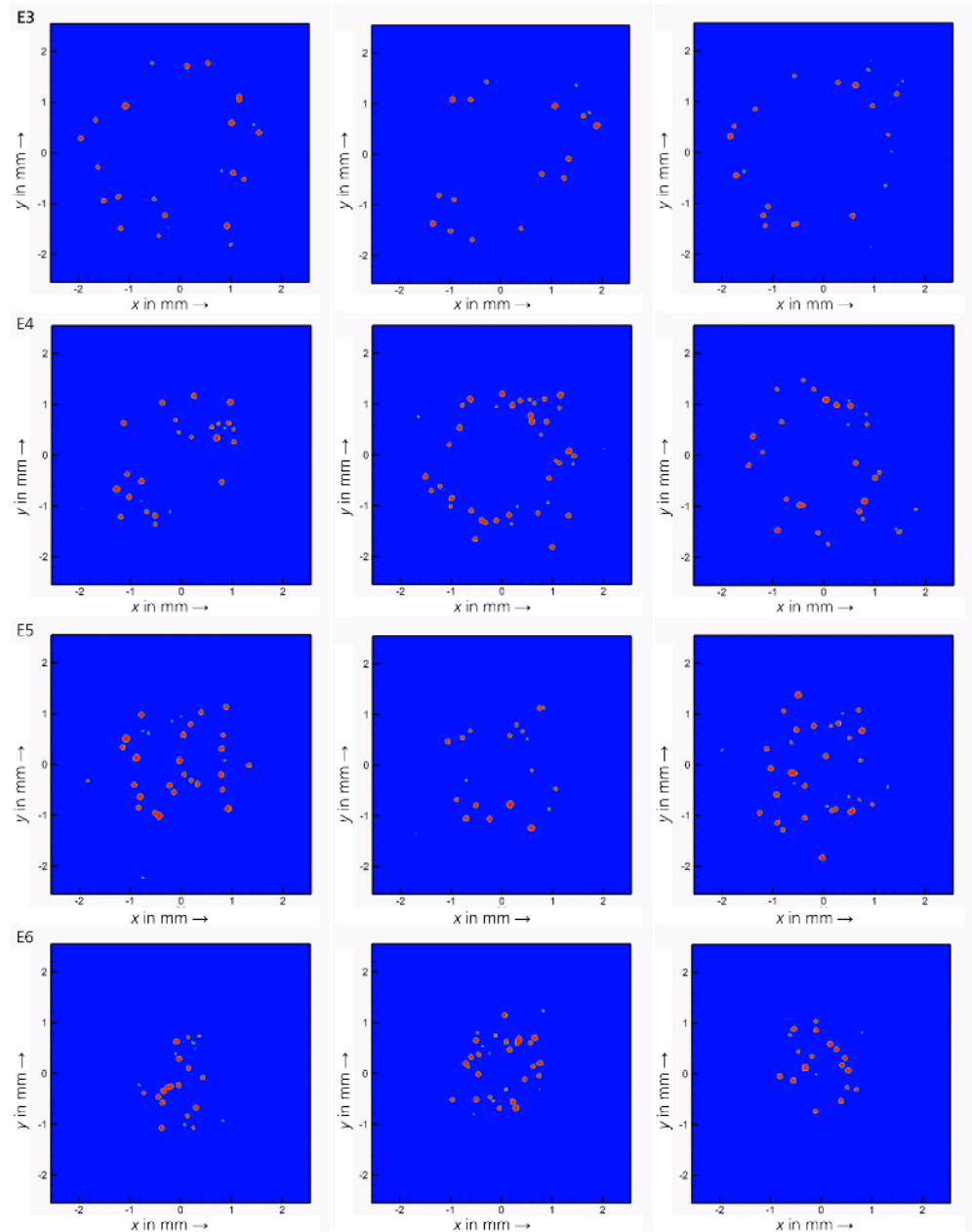
Parameter:

KF 2

$\dot{m}_p = 5 \text{ g/min}$

$V_{FG} = 5 \text{ l/min}$

$V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



In Bild 24 ist exemplarisch die Überlagerung mehrerer Partikel in der x-y-Ebene innerhalb eines Einzelbildes abgebildet. Infolge der zunehmenden Partikeldichte entlang der Strahlachse durch die Abnahme der Pulver-Gas-Strahl-Querschnittsfläche und der daraus folgenden zunehmenden Überlagerung von Partikeln wird für die untersuchten Pulvermassenströme ab Ebene E6 eine signifikant geringere Anzahl von Partikeln gegenüber Ebene E3 detektiert.

Bild 24

Schematische Darstellung der partiellen Überlagerung in der x-y-Ebene innerhalb eines Einzelbildes in Ebene E4

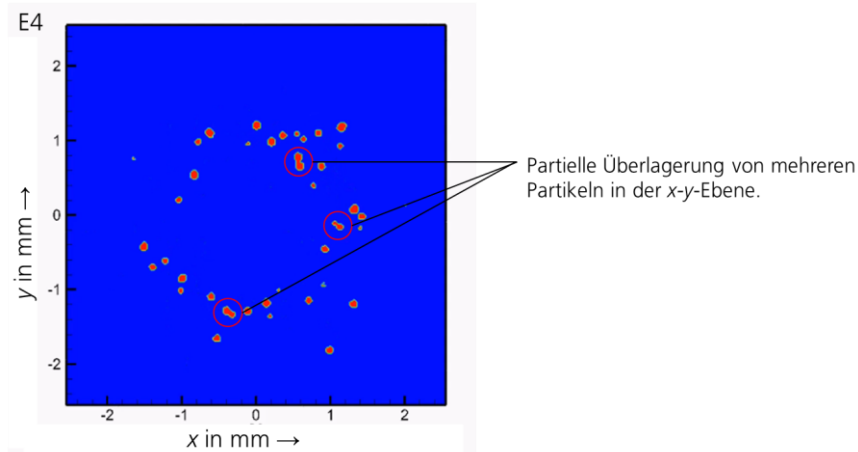
Parameter:

KF 2

$\dot{m}_p = 5 \text{ g/min}$

$V_{FG} = 5 \text{ l/min}$

$V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Zur Bestimmung der mittleren Partikelanzahl je Ebene wird daher im Folgenden E3 (Referenzebene) verwendet und die Pulverpartikeldichteverteilung in den bzgl. der z-Ebene darunter liegenden Ebenen mit Hilfe eines statistischen Modells für die Partikeltrajektorien beschrieben (s. Kap. 5.3).

Einfluss der Partikelgröße/Kornfraktion

In Bild 25 ist das Ergebnis der Partikeldetektion mit der Anzahl detektierter Partikel n je Einzelbild für den Referenzparametersatz in E3 bei Variation des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ von Kornfraktion KF1 bis KF3 dargestellt. Dabei werden für die KF1 mit der geringsten mittleren Partikelgröße (mittlerer Korndurchmesser: $24,92 \mu\text{m}$) mit 165 Partikeln die meisten Partikel je Einzelbild detektiert. Für die Referenzeinstellung mit KF2 (mittlerer Korndurchmesser: $35,28 \mu\text{m}$) werden 68 und für KF3 (mittlerer Korndurchmesser: $68,91 \mu\text{m}$) 12 Partikel je Einzelbild gemessen.

Bild 25

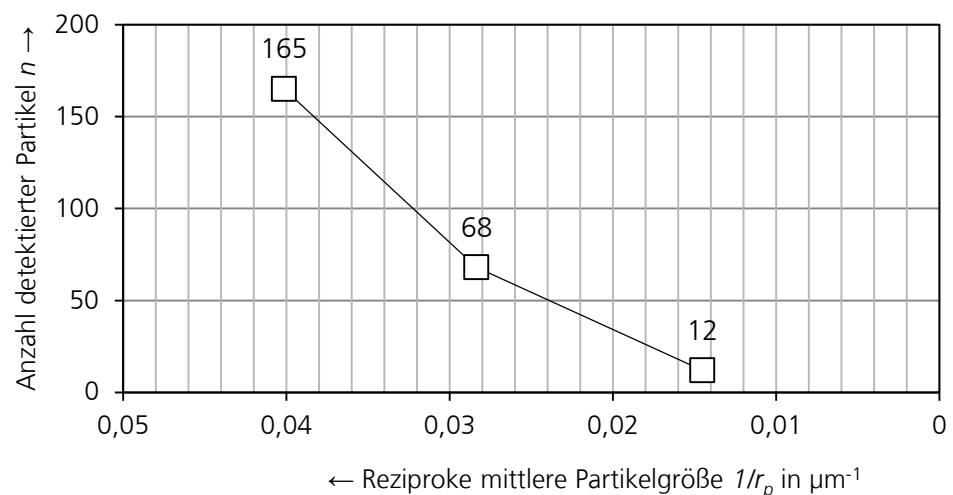
Anzahl detektierter Partikel n in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ in E3

Parameter:

$\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$

$V_{FG} = 5 \text{ l/min}$

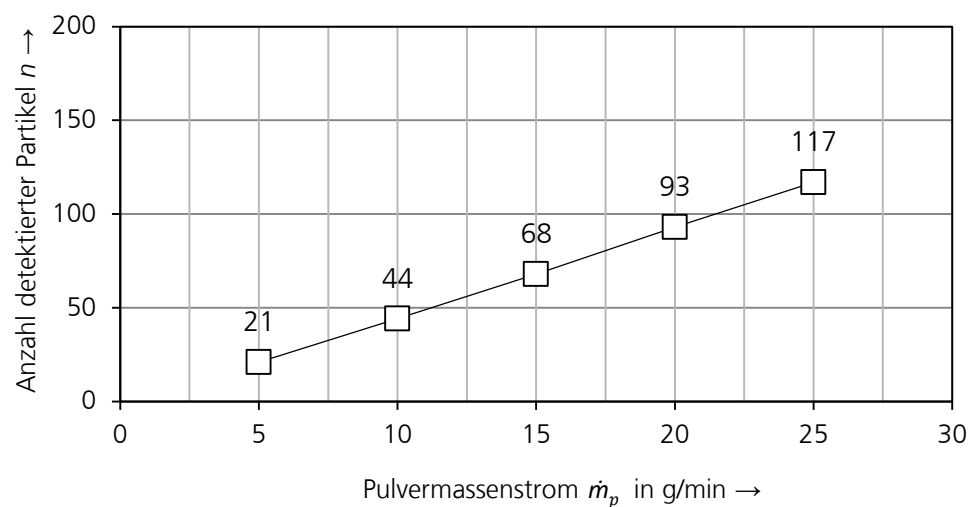
$V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Pulvermassenstroms

In Bild 26 ist das Ergebnis der Partikeldetektion je Einzelbild für den Referenzparametersatz in E3 bei Variation des Pulvermassenstroms zwischen 5 g/min (Anzahl detektierter Partikel: 21) und 25 g/min (Anzahl detektierter Partikel: 117) abgebildet. Der Verlauf der Anzahl detektierter Partikel n in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ ist bei zunehmendem Pulvermassenstrom infolge der Abnahme der mittleren Partikelgeschwindigkeit bei zunehmendem Pulvermassenstrom progressiv.

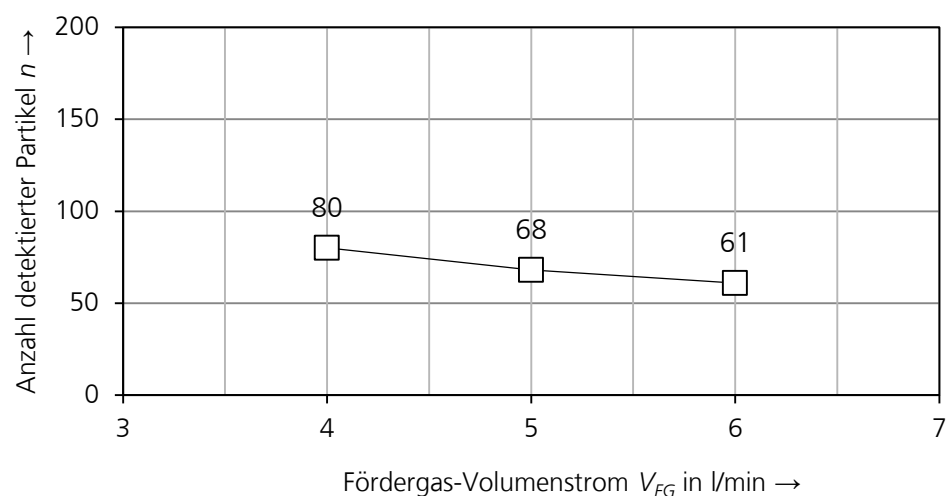
Bild 26
Anzahl detektierter Partikel n in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ in E3
Parameter:
KF2
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Fördergas-Volumenstroms

In Bild 27 ist das Ergebnis der Partikeldetektion je Einzelbild bei Variation des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} für den Referenzparametersatz von 4 bis 6 l/min dargestellt. Die Anzahl detektierter Partikel n beträgt zwischen 80 Partikel (4 l/min) und 61 Partikel (6 l/min) und nimmt bei Vergrößerung des Fördergas-Volumenstroms infolge der zunehmenden mittleren Partikelgeschwindigkeit ab.

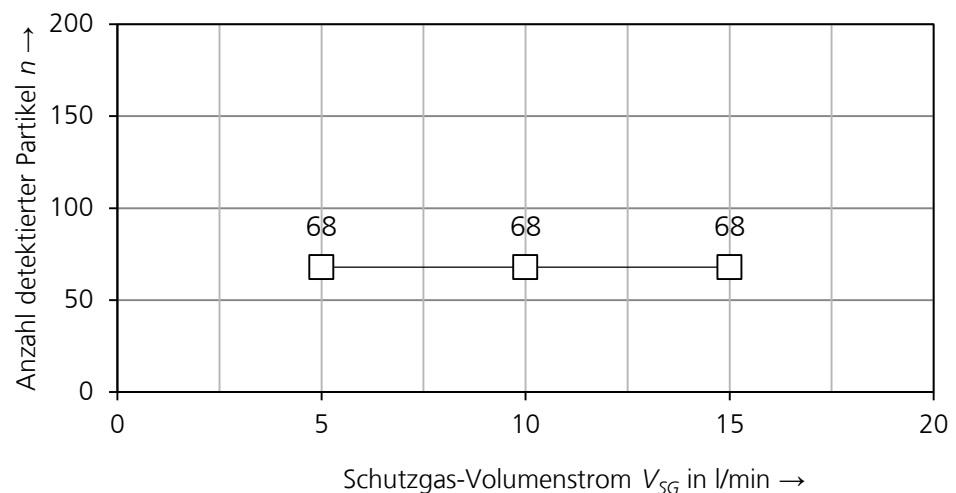
Bild 27
Anzahl detektierter Partikel n in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} in E3
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Schutzgas-Volumenstroms

In Bild 28 ist das Ergebnis der Partikeldetektion je Einzelbild für den Referenzparametersatz in E3 bei Variation des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} zwischen 5 l/min und 15 l/min abgebildet. Im untersuchten Bereich beträgt die Anzahl detektierter Partikel n unabhängig vom Schutzgas-Volumenstrom konstant 68.

Bild 28
Anzahl detektierter Partikel n in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} in E3
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$



5.2 Approximation der Partikelgeschwindigkeit

Die Anzahl der Partikel n in einem Volumen kann allgemein über das Volumenintegral der Partikeldichteverteilung des Pulver-Gas-Strahls $n(x,y,z)$ ausgedrückt werden, Formel 5.1.

$$5.1 \quad n = \int n(x, y, z) dx dy dz$$

Innerhalb der Höhe der Messebene Δz entspricht die Anzahl der Partikel n (vgl. Kap. 5.1) dem Zusammenhang gemäß Formel 5.2.

$$5.2 \quad \frac{n}{\Delta z} = \int n(x, y, z) dx dy$$

Dem Pulvermassenstrom $\dot{m}_p$ entspricht die mittlere Partikelanzahl pro Ebene multipliziert mit der Pulvermasse eines einzelnen Partikels m_p mit der mittleren Partikelgeschwindigkeit $\bar{v}_p$, Formel 5.3.

$$5.3 \quad \dot{m}_p = \frac{n}{\Delta z} m_p \bar{v}_p$$

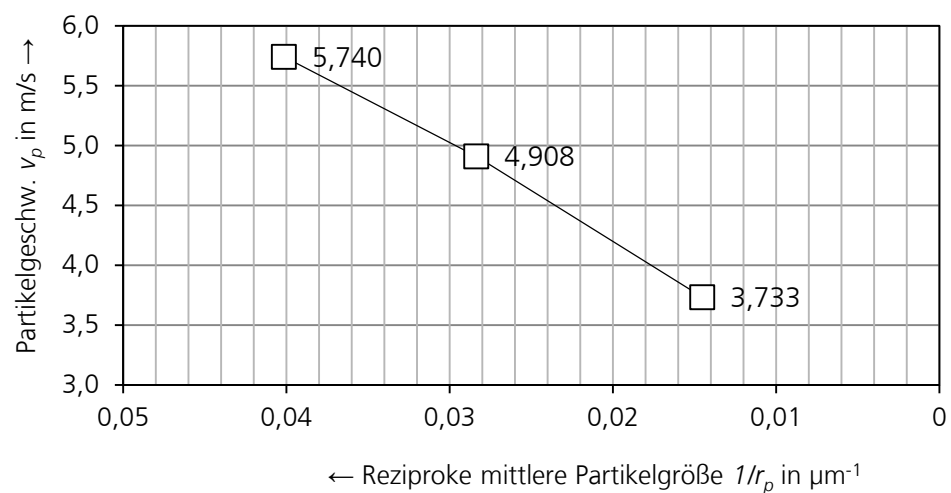
Daraus ergibt sich die mittlere Partikelgeschwindigkeit v_p zu Formel 5.4.

$$5.4 \quad v_p = \frac{\Delta z \dot{m}_p}{n m_p}$$

Einfluss der Partikelgröße/Kornfraktion

In Bild 29 ist die auf Basis dieses Vorgehens ermittelte Partikelgeschwindigkeit v_p für den Referenzparametersatz bei Variation des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ für Kornfraktion KF1 bis KF3 abgebildet. Der Verlauf der Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers ist zwischen 5,74 m/s (KF1) und 3,733 m/s (KF3) nahezu linear.

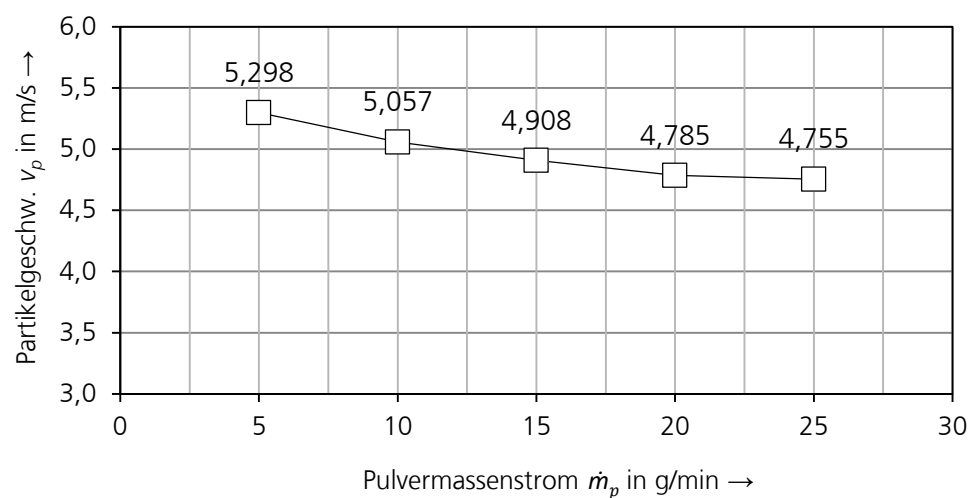
Bild 29
Partikelgeschwindigkeit v_p in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$
Parameter:
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Pulvermassenstroms

In Bild 30 ist die ermittelte Partikelgeschwindigkeit v_p für die Referenzeinstellung bei Variation des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ zwischen 5 g/min und 25 g/min dargestellt. Der Verlauf ist degressiv mit mittleren Partikelgeschwindigkeiten im Bereich von 5,298 m/s ($\dot{m}_p = 5 \text{ g/min}$) bis 4,755 m/s ($\dot{m}_p = 25 \text{ g/min}$).

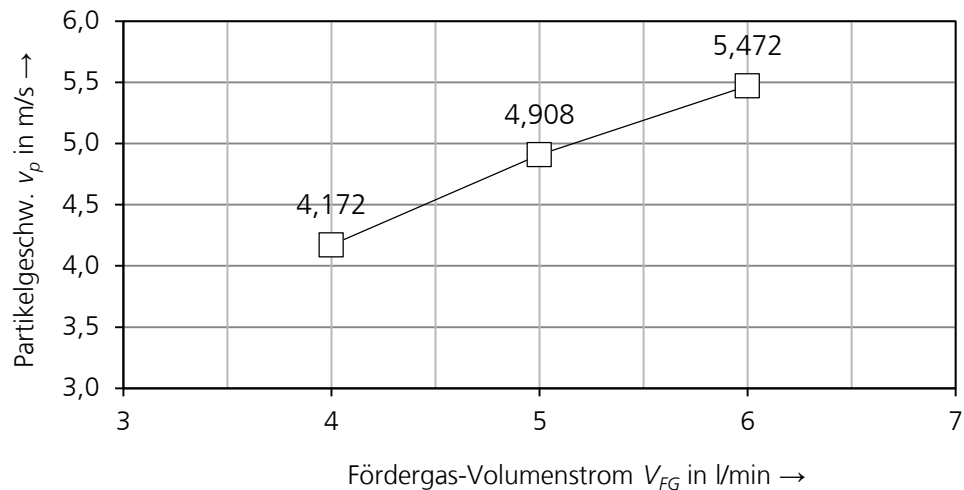
Bild 30
Partikelgeschwindigkeit v_p in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$
Parameter:
KF2
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Fördergas-Volumenstroms

In Bild 31 ist die ermittelte Partikelgeschwindigkeit v_p für die Referenzeinstellungen bei Variation des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} zwischen 4 l/min und 6 l/min abgebildet. Der Verlauf ist nahezu linear mit Partikelgeschwindigkeiten im Bereich von 4,172 m/s ($V_{FG} = 4$ l/min) bis 5,472 m/s ($V_{FG} = 6$ l/min).

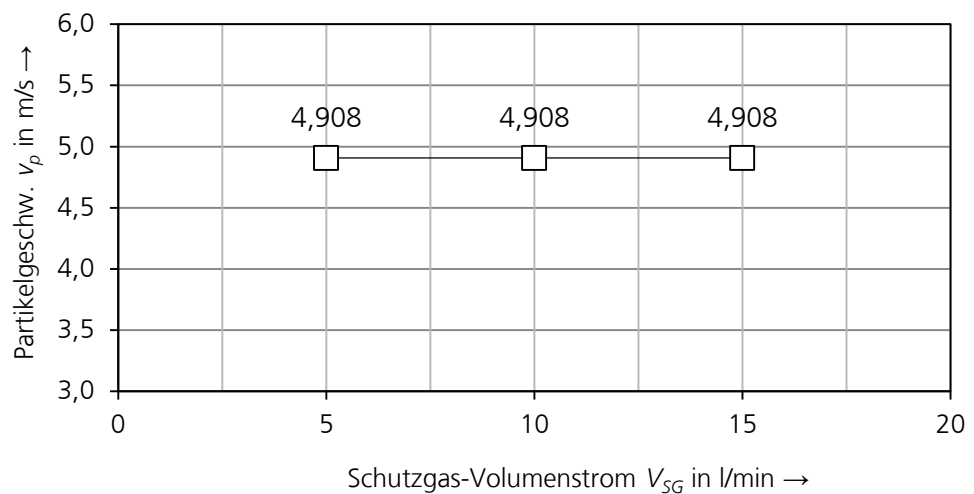
Bild 31
Partikelgeschwindigkeit v_p in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG}
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{SG} = 10$ l/min



Einfluss des Schutzgas-Volumenstroms

In Bild 32 ist die Partikelgeschwindigkeit v_p für die Referenzeinstellungen in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} zwischen 5 l/min und 15 l/min aufgetragen. Da die gemessenen Partikelanzahlen unabhängig vom Schutzgas-Volumenstrom sind (vgl. Kap. 5.1), ist auch die Partikelgeschwindigkeit unabhängig vom Schutzgas-Volumenstrom und beträgt konstant 4,908 m/s.

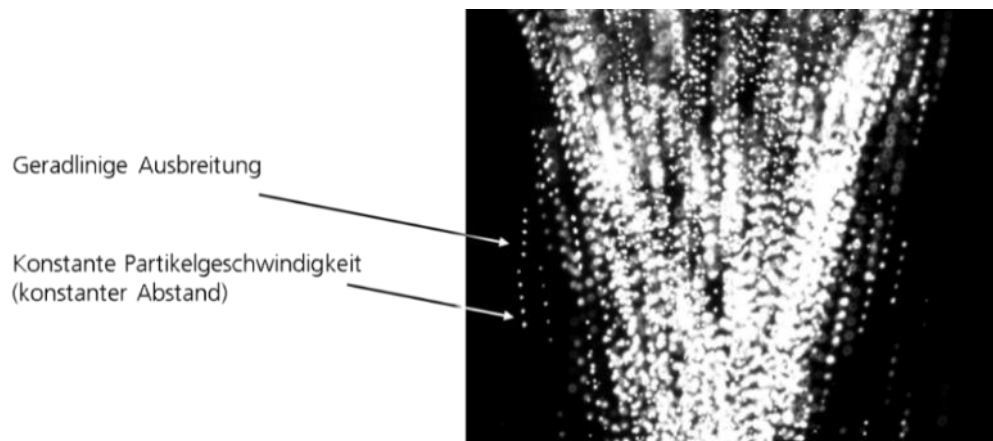
Bild 32
Partikelgeschwindigkeit v_p in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG}
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{FG} = 5$ l/min



5.3 Partikelpropagationsmodell

Die Partikelanzahl kann aufgrund zu großer Partikeldichten infolge der Partikel-Partikel-Abschattung (vgl. Kap. 5.1) nicht in jeder Ebene in ausreichender Genauigkeit gemessen werden. Da aber die Partikel nach dem Austritt aus der Düse eine geradlinige Bewegung ausführen, lassen sich die Partikeltrajektorien mit einem statistischen Modell beschreiben. Die Annahme konstanter Partikelgeschwindigkeit und der geradlinigen Ausbreitung kann anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Pulver-Gas-Strahls bestätigt werden. In Bild 33 ist exemplarisch eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Kamera Fa. VKT Video Kommunikation GmbH, Photron FASTCAM SA5) bei Mehrfachbelichtung des Pulver-Gas-Strahls mit Kornfraktion KF1 bei einem Pulvermassenstrom von 5 g/min dargestellt, die repräsentativ für den untersuchten Verfahrensparameterbereich ist. Die Punkte liegen auf einer Linie (geradlinige Ausbreitung) und haben approximativ einen konstanten Abstand (konstante Partikelgeschwindigkeit) zueinander.

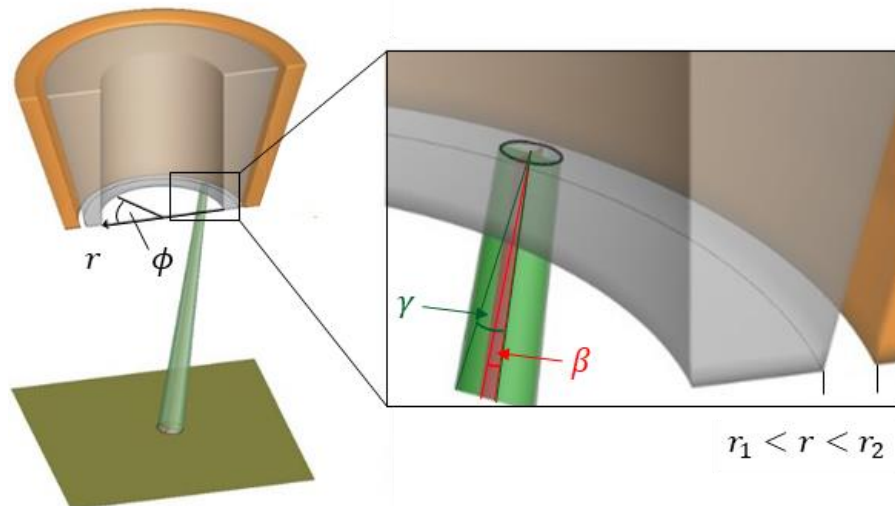
Bild 33
Hochgeschwindigkeits-Aufnahme des Pulver-Gas-Strahls, mehrfache Belichtung.
Parameter:
KF1
 $\dot{m}_p = 5 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Zur statistischen Beschreibung der Partikeltrajektorien wird eine Verteilung bezüglich der Startpunkte und Flugrichtung an der Düsenaustrittsöffnung benötigt. Die Richtung des Partikels wird von einem Richtungsvektor vorgegeben, der sich zunächst aus dem Neigungswinkel der Düse ergibt. Dieser wird in den zwei dazu senkrechten Richtungen verkippt (siehe Bild 34, links). An der Düsenaustrittsfläche wird eine durch die Düsenwände begrenzte ($r_1 < r < r_2$), bzgl. r gaußförmige und bzgl. ϕ gleichverteilte Startverteilung mit einem Ensemble von $5 \cdot 10^5$ Partikeln vorgegeben. In der Startverteilung werden die Neigungswinkel bzgl. β $N(\beta, \Delta\beta^2)$ und γ normalverteilt $N(0, \Delta\gamma^2)$ vorgegeben. Die Startpunkte an der Düsenauslassöffnung sind im Ringspalt gleichverteilt. Die Anzahl der Partikel pro Sekunde ergibt sich aus dem Pulvermassenstrom und dem mittleren Partikeldurchmesser. Auf Basis dieser Eingangsdaten wird die resultierende Partikeldichte in der Referenzebene berechnet. Diese stimmt nicht mit der gemessenen Verteilung überein, sollte diese aber durch eine geeignete Wahl von γ und β überdecken (vgl. Bild 35, links).

Bild 34

Schematische Darstellung der Parameter für das Partikelpropagationsmodell. Links: Beschreibung der Pulverpartikeldichteverteilung mit Polarkoordinaten (r, ϕ) . Rechts: Modellparameter zur Anpassung der Neigungswinkel bzgl. der z-Achse: β und der x-y-Achse: γ

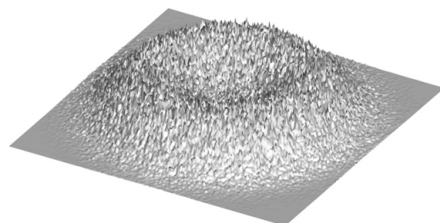


Im nächsten Schritt wird die berechnete Häufigkeitsverteilung auf eins normiert, d. h. der Maximalwert ist gleich eins. Eine Sequenz von gleichverteilten Zufallszahlen im Bereich $[0, 1]$ mit der gleichen Länge wie das statistische Partikelsenemble wird generiert. Jedem Partikel wird aus dieser Sequenz die entsprechende Zufallszahl zugeordnet. Liegt die Zufallszahl für das Partikel oberhalb der normierten gemessenen Verteilung, wird das Partikel aus der Liste entfernt. Durch die verbleibenden Partikel wird eine Partikeldichte in der Ebene E3 erzeugt, die approximativ mit der gemessenen Partikeldichte übereinstimmt. In Bild 35 ist exemplarisch das Ergebnis der Anpassung der Modellparameter β und γ sowie der Filterung der Trajektorien für die Partikeldichteverteilung eines Pulver-Gas-Strahls mit Kornfraktion KF2 und einem Pulvermassenstrom von 5 g/min in Ebene E3 abgebildet. Dabei wird die gemessene Partikeldichteverteilung zusätzlich mit Hilfe nichtuniformer rationaler B-Splines (NURBS) geglättet.

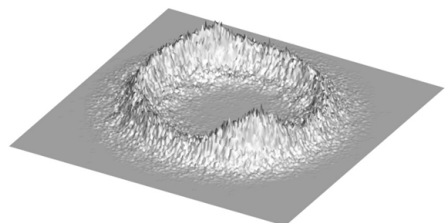
Bild 35

Links: Partikeldichteverteilung mit geeigneter Wahl der Modellparameter β und γ in Ebene E3 und auf Basis der bzgl. r gauß- und bzgl. ϕ gleichverteilten Startverteilung. Rechts: Partikeldichteverteilung nach statistischer Filterung der Partikeltrajektorien

Partikeldichteverteilung der Startverteilung des Partikelpropagationsmodells ohne Anpassung der Modellparameter β und γ und Filterung der Partikeltrajektorien in Ebene E3

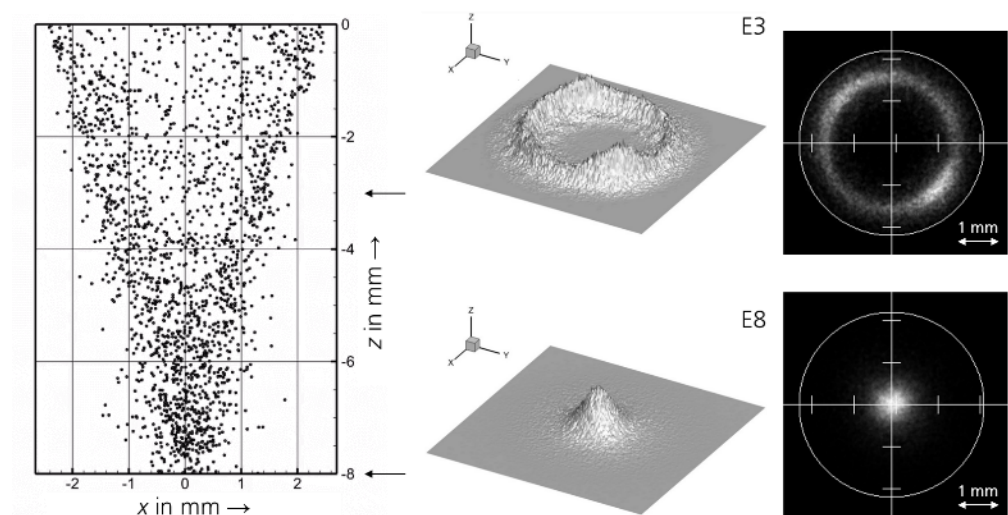


Partikeldichteverteilung nach Anpassung der Modellparameter β und γ und Abgleich mit der gemessenen Partikeldichteverteilung in Ebene E3



In Bild 36 ist links exemplarisch der modellierte Pulver-Gas-Strahl für die Kornfraktion KF2 mit einem Pulvermassenstrom von 5 g/min mit einem Abstand von bis zu 8 mm von der Düsen Spitze dargestellt. In der Mitte sind die modellierten Partikeldichteverteilungen sowie rechts die summierten 3000 Einzelbilder aus der Pulver-Gas-Strahl-Vermessung mittels Laserlichtschnittverfahren der Ebenen E3 und E8 abgebildet. Das Ergebnis ist eine numerische Beschreibung der Partikeltrajektorien unter Berücksichtigung der gemessenen Korngrößenverteilung unter der Annahme konstanter Partikelgeschwindigkeit und geradliniger Trajektorien der Partikel.

Bild 36
Links: Seitenansicht des simulierten Pulver-Gas-Strahls.
Mitte: simulierte Partikeldichteverteilung für die Ebenen E3 und E8. Rechts: 3000 überlagerte Einzelbilder der Vermessung des Pulver-Gas-Strahls.
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 5 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$

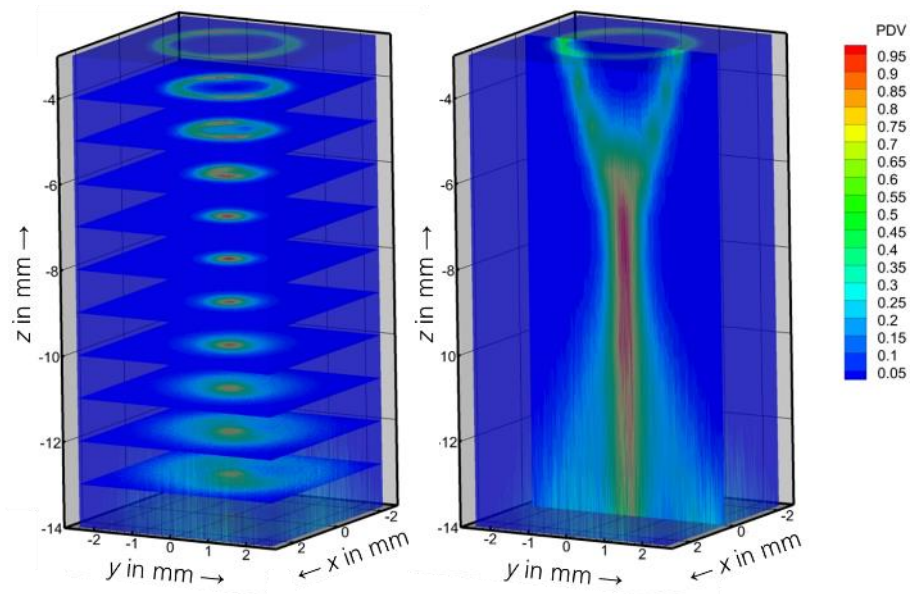


5.4 Pulverpartikeldichteverteilung

Mit Hilfe des statistischen Modells für die Partikeltrajektorien kann die Partikeldichte auch für Bereiche bestimmt werden, bei denen die Partikeldichte aufgrund der partiellen Partikelüberlagerungen in der x-y-Ebene infolge des abnehmenden Pulver-Gas-Strahl-Querschnitts nicht direkt gemessen werden kann (vgl. Kap. 5.1). Zur Vergleichbarkeit der Partikeldichteverteilung des Pulver-Gas-Strahls entlang der Strahlpropagationsrichtung bei unterschiedlichen Einstellungen für die Pulverförderung wurde ebenenweise eine Wahrscheinlichkeitsdichte bestimmt, bei der das Integral der Dichteverteilung über dx , dy auf den Wert 1 normiert wird. Die Pulverpartikeldichteverteilung in absoluten Einheiten (Partikel je Kubikmillimeter) kann durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeitsdichte mit der Höhe der Beleuchtungslaserstrahlung dz und entsprechender Normierung auf die Anzahl der Partikel je Ebene berechnet werden, worauf in der weiteren Betrachtung allerdings verzichtet wird. In Bild 37 ist exemplarisch die modellierte Wahrscheinlichkeitsdichte für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes zwischen $z = -3 \text{ mm}$ und $z = -14 \text{ mm}$, sowohl ebenenweise (links) und bei $x = \text{konst.}$ (rechts) dargestellt. Die Pulverpartikeldichte entwickelt sich

ausgehend von einer Ringverteilung an der Düsenöffnung zu einer zentrierten Verteilung im Fokus des Pulverstrahls entlang der Strahlrichtung. In den bzgl. der Strahlachse unter dem Pulverfokus liegenden Ebenen verbreitert sich der Pulver-Gas-Strahl kontinuierlich.

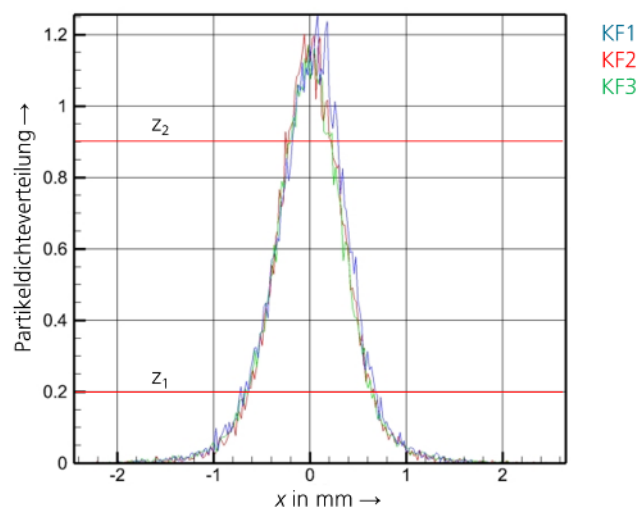
Bild 37
Links: Ebenenweise Wahrscheinlichkeitsdichte in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes
Rechts: Wahrscheinlichkeitsdichte in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes für $x = \text{konst.}$
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$



Einfluss der Partikelgröße/Kornfraktion

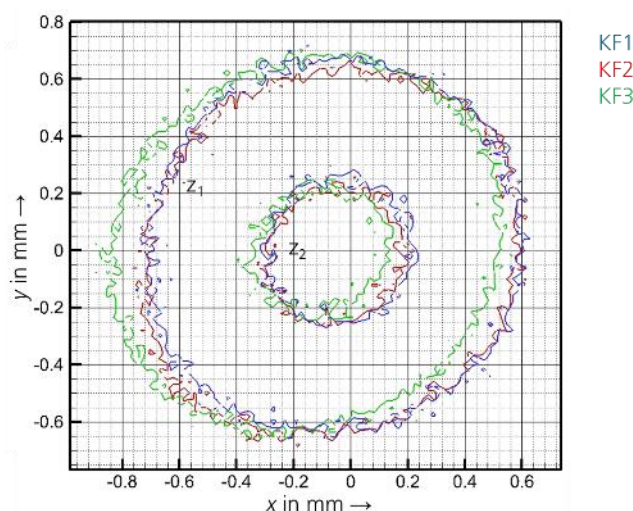
In Bild 38 sind die berechneten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen bei $y = 0$ für den Referenzparametersatz in Abhängigkeit der Kornfraktion KF1 bis KF3 in der Ebene E8, sowie zwei Schnitte konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ abgebildet.

Bild 38
Modellierte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung bei $y = 0$ in Ebene E8 in Abhängigkeit der Kornfraktion KF1-KF3
Parameter:
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Für die Wahrscheinlichkeitsdichten ergibt sich eine statistische, nicht signifikant voneinander abweichende Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung. In Bild 39 sind die Schnitte konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ der modellierten Verteilung in Ebene E8 für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit der Kornfraktion KF1 bis KF3 dargestellt. Demnach unterscheiden sich die Pulverpartikeldichteverteilungen lediglich bzgl. der Anzahl der Partikel je Ebene, jedoch nur vernachlässigbar bzgl. Lage, Breite und Maximum der Pulver-Gas-Strahl-Kaustik.

Bild 39
Schnitte konstanter, modellierter Wahrscheinlichkeitsdichte in Ebene E8 bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ in Abhängigkeit der Kornfraktion KF1-KF3
Parameter:
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$

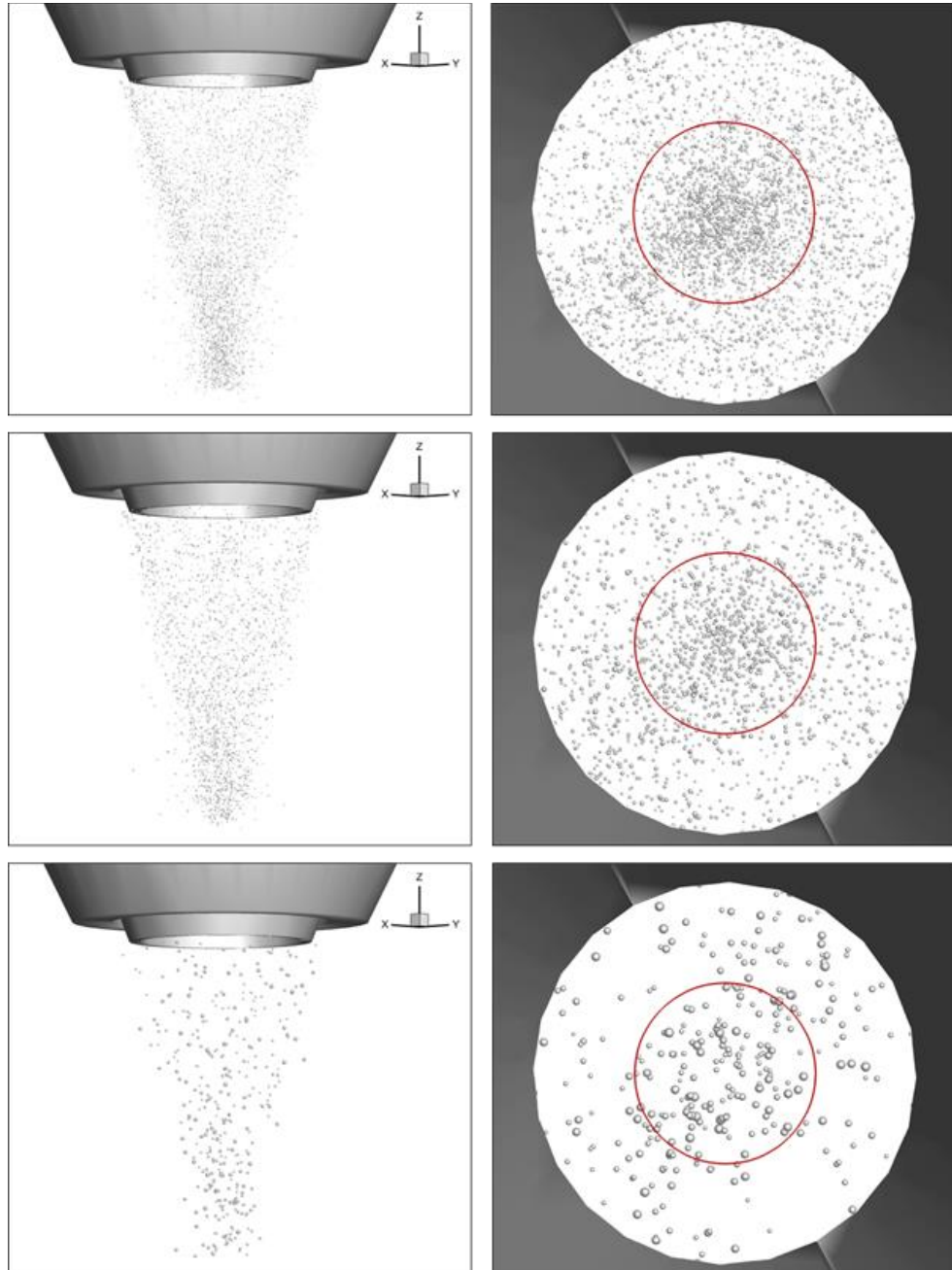


In Bild 40 sind links die Seitenansichten des modellierten Pulver-Gas-Strahls für die Referenzeinstellungen in Abhängigkeit der gemessenen Korngrößenverteilung für Kornfraktion KF1 bis KF3 und rechts die coaxialen Ansichten des Pulver-Gas-Strahls bis zu einem Abstand von 8 mm zur Düsen Spitze (E8) mit Angabe des Laserstrahldurchmessers in der Bearbeitungsebene (rot) abgebildet. Deutlich sichtbar ist trotz vergleichbarer Wahrscheinlichkeitsdichte die drastische Zunahme der Partikeldichte infolge der Zunahme der Partikelanzahlen bei Abnahme des mittleren Korndurchmessers.

Einfluss des Pulvermassenstroms

In Bild 41 ist oben die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Messdaten in der Referenzebene E3 für den Referenzparametersatz bei Variation des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ zwischen 5 g/min und 25 g/min (v. l. n. r.) aufgetragen. Bei Variation des Pulvermassenstroms kann in der Referenzebene E3 kein signifikanter Unterschied bzgl. der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung bei Variation des Pulvermassenstroms gemessen werden, sodass sich auch die Verläufe der modellierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bzgl. Maxima und Geometrie entlang der Strahlachse nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Bild 40
Jeweils links: Seiten-
ansicht des simulier-
ten Pulver-Gas-
Strahls bis Ebene E8.
Jeweils rechts: koaxi-
ale Ansicht des Pul-
ver-Gas-Strahls für
Ebene E8, rot: Laser-
strahl.
Oben: KF1
Mitte: KF2
Unten: KF3
Parameter:
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



In Bild 41, Mitte, sind die jeweils 3000 überlagerten Einzelbilder der Vermessung des Pulver-Gas-Strahls in Ebene E8 für den Referenzparametersatz bei Variation des Pulvermassenstroms zwischen 5 g/min und 25 g/min (v. l. n. r.) dargestellt. In Bild 41 unten abgebildet sind die berechnete Wahrscheinlichkeitsdichte der Ebene E8. In dem grünen Kreis markiert ist jeweils der Pulverfokusdurchmesser von jeweils ca. 1 mm.

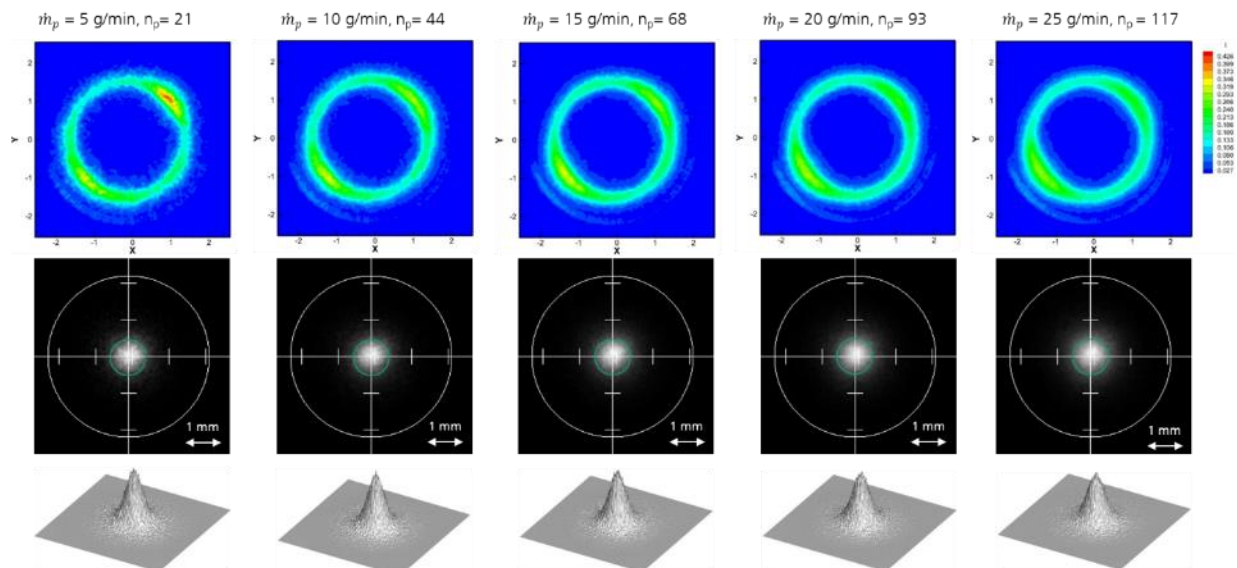
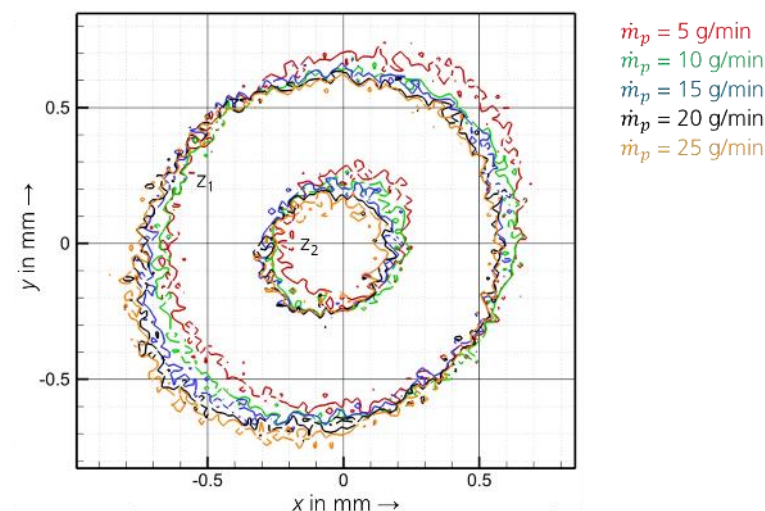


Bild 41 Oben: Gemessene Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung in der Referenzebene E3. Partikelzahlen gemäß Bild 26. Mitte: jeweils 3000 überlagerte Einzelbilder der Vermessung des Pulver-Gas-Strahls in Ebene E8. Grün dargestellt, Pulverfokusdurchmesser, ca. 1 mm. Unten: modellierte Wahrscheinlichkeitsdichte in der Ebene E8 (Normierung auf Integral über $dx, dy = 1$)

In Bild 42 sind die Schnitte konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ der modellierten Verteilung in Ebene E8 für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms zwischen 5 g/min und 25 g/min abgebildet. Trotz zunehmender Pulverpartikelanzahlen bei Vergrößerung des Pulvermassenstroms unterscheiden sich der Verlauf der Pulver-Gas-Strahl-Kaustik oder des Pulverfokusdurchmessers nur im Rahmen einer nicht signifikanten, statistischen Streuung und einer geringen Verschiebung in x- bzw. y-Richtung.

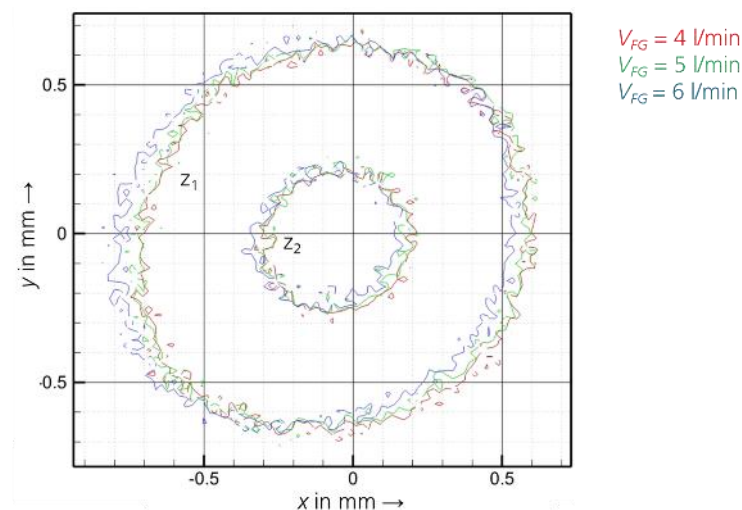
Bild 42
Schnitte konstanter
modellierter
Wahrscheinlich-
keitsdichte in
Ebene E8 bei
 $z_1 = 0,2$ und
 $z_2 = 0,9$ in Abhän-
gigkeit des Pulver-
massenstroms $\dot{m}_p$
Parameter:
KF2
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Fördergas-Volumenstroms

In Bild 43 sind die Schnitte konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ der modellierten Verteilung in Ebene E8 für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms zwischen 4 l/min und 6 l/min aufgetragen. Die Verläufe der modellierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen unterscheiden sich bei Variation des Fördergas-Volumenstroms bzgl. Verlauf, Maxima und Breite nicht signifikant voneinander.

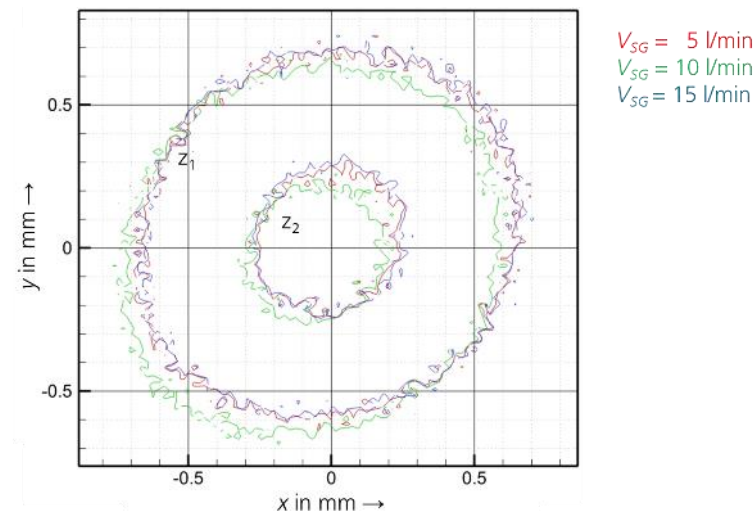
Bild 43
Schnitte konstanter modellierter Wahrscheinlichkeitsdichte in Ebene E8 bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG}
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Schutzgas-Volumenstroms

In Bild 44 sind die Schnitte konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ der modellierten Verteilung in Ebene E8 für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms zwischen 5 l/min und 15 l/min dargestellt.

Bild 44
Schnitte konstanter modellierter Wahrscheinlichkeitsdichte in Ebene E8 bei $z_1 = 0,2$ und $z_2 = 0,9$ in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG}
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$



Zwischen den unterschiedlichen Schutzgas-Volumenströmen kann kein signifikanter Einfluss auf die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung respektive auf die Pulver-Gas-Strahlkaustik, die Maxima oder die Breite der Wahrscheinlichkeitsdichte beobachtet werden.

5.5 Laserleistungsdichteverteilung

Mit Hilfe eines modifizierten Super-Gauß-Ansatzes kann die Laserleistungsdichteverteilung $I(x, y)$ mit der Strahlausdehnung $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ entlang der Propagationsrichtung mit Formel 5.5 exakt beschrieben werden:

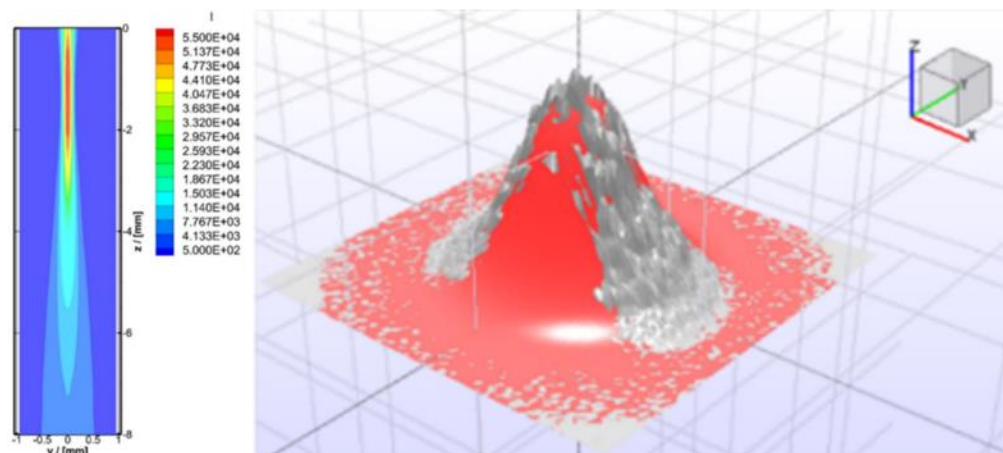
$$5.5 \quad I(x, y) = I_0 \cdot \left(\exp \left(-f(n) \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \right) - \exp \left(-f(n) \cdot \left(\frac{r_{Limit}}{r_0} \right)^n \right) \right)$$

Dabei ist I_0 ein Normierungsfaktor, r_0 entspricht dem Strahlradius nach ISO 13694:2015, r_{Limit} einem Grenzstrahlradius, für den die Intensitätsverteilung bei $r > r_{Limit}$ einen Wert von Null annimmt. Der dimensionslose Parameter n ist ein Maß für die Steilheit der Flanken. Anhand der Messdaten der Leistungsdichteverteilung wird für die einzelnen Ebenen der Rauschpegel bestimmt und dessen Mittelwert von der gemessenen Leistungsdichteverteilung subtrahiert. Anschließend wird r_{Limit} so bestimmt, dass 99 % der gemessenen Leistungsdichteverteilung eingeschlossen werden, und das Integral der Intensitätsverteilung auf 1 W normiert. Die Funktion $f(n)$ wird gemäß Formel 5.6 bestimmt.

$$5.6 \quad 0,864 = \int_{r \leq r_0} I(x, y) dx dy / \int I(x, y) dx dy$$

In Bild 45 sind links die mit dem modifizierten Super-Gauß-Ansatz modellierte Laserleistungsdichteverteilung entlang der Strahlachse und rechts die modellierte Laserleistungsdichteverteilung (rot) gegenüber der gemessenen Laserleistungsdichteverteilung (grau) in der Ebene E8 abgebildet.

Bild 45
Mit modifiziertem Super-Gauß-Ansatz modellierte Laserleistungsdichteverteilung bei einer Laserleistung von $P_L = 1500$ W. Strahlquelle LDF-4000-8, Optik: OTS-5, Brennweite Fokussierlinse: 200 mm, Brennweite Kollimation: 200 mm

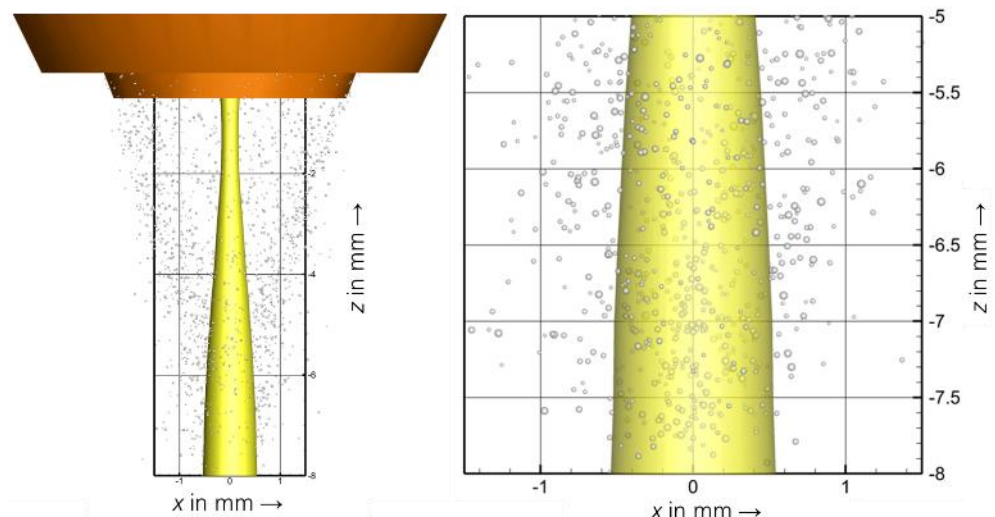


6 Strahl-Stoff-Wechselwirkung

6.1 Transmissionsgrad

Zur Berechnung der transmittierten Laserstrahlung entlang der Strahlachse wurden $5 \cdot 10^5$ Momentaufnahmen der Partikelverteilung unterhalb der Düsenöffnung betrachtet. Dabei wurde orts- und zeitaufgelöst ermittelt, welcher Bereich auf der Zielebene durch darüber liegende Partikel entlang des Strahlengangs unter Annahme geometrischer Optik abgeschattet wird. Zudem wurde durch Mittelung der Momentaufnahmen ein orts aufgelöster Transmissionsgrad für die Zielebene berechnet. Die transmittierte Laserleistungsdichteverteilung ergibt sich als Produkt zwischen modellierter Laserleistungsdichteverteilung und dem Transmissionsgrad. In Bild 46 ist exemplarisch die Strahlausdehnung entlang der Strahlachse über eine Momentaufnahme der Partikelverteilung gelegt. Mit dieser Darstellung kann die Strahl-Stoff-Wechselwirkung oberhalb des Substrates visualisiert werden. Die Partikelverteilung ist für die verwendete ILT-COAX40-fein-Pulverzufuhrdüse mit Kornfraktion KF2 bei einem Pulvermassenstrom von 15 g/min erstellt, wobei die Laserstrahlung so defokussiert wird, dass der Laserstrahldurchmesser bei einem Arbeitsabstand von $z = -8$ mm etwa 1,13 mm entspricht.

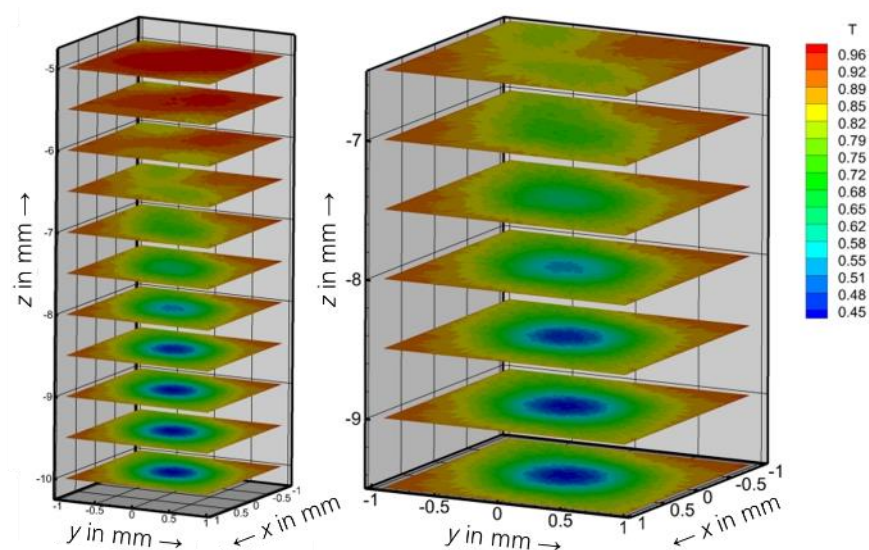
Bild 46
Schematische Darstellung der Wechselwirkungszone in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes z bei unterschiedlichen Vergrößerungen.
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min,
 $V_{FG} = 5$ l/min
 $V_{FG} = 10$ l/min



In Bild 47 ist der Transmissionsgrad T (Transmissionsfunktion) zwischen $0 \leq T \leq 1$ orts aufgelöst für die Referenzeinstellungen dargestellt. Dabei nimmt der maximale Transmissionsgrad entlang der Strahlachse z stetig zu. Vor Ebene E6 wird

infolge der geringen Partikeldichten nur ein geringer Teil der Strahlung abgeschattet. Die Asymmetrie der Pulverpartikeldichte (vgl. Kap. 5.4) und damit auch der Transmissionsfunktion in den Ebenen E3 bis E6 wird mit abnehmendem Abstand zum Bereich des Pulverfokus (etwa bei E7 bis E8) zunehmend geringer. Ab etwa Ebene E7 ist die Transmissionsfunktion nahezu vollständig symmetrisch bzgl. der x-y-Ebene. Im Zentrum ($x = y = 0$) sind die größten Partikeldichten, respektive ist dort der Transmissionsgrad am kleinsten. Im Außenbereich wird ein größerer Anteil der Strahlung transmittiert.

Bild 47
Transmissionsgrad
in Abhängigkeit
des Arbeitsabstan-
des z
Parameter: KF2,
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Dabei variiert sowohl die Strahlausdehnung als auch der Transmissionsgrad innerhalb der Strahlausdehnung je nach Ebene nicht unerheblich. In Bild 48 ist v. l. n. r. für die Arbeitsabstände von $z = -9 \text{ mm}$ bis $z = -7 \text{ mm}$ jeweils oben die modellierte, eingestrahelte Laserleistungsdichteverteilung und in der Mitte die transmittierte Laserleistungsdichteverteilung auf Basis der orts aufgelösten Abschattung abgebildet. Unten dargestellt sind mit den durchgängigen farbigen Linien die Schnitte der modellierten, eingestrahelten Laserleistungsdichteverteilung, mit den schwarzen Linien die Schnitte der transmittierten Laserleistungsdichteverteilung auf Basis der orts aufgelösten Abschattung und mit den Strich-Punkt-Linien die transmittierte Laserleistungsdichteverteilung auf Basis eines konstanten mittleren Transmissionsgrades. Für einen Arbeitsabstand von $z = -7 \text{ mm}$ kann der Verlauf der transmittierten Laserleistungsdichteverteilung mit großer Übereinstimmung durch einen konstanten mittleren Transmissionsgrad als Mittelwert des Transmissionsgrades mit einem Radius von $0,1 \text{ mm}$ um das Strahlzentrum angenähert werden. Bei zunehmendem Arbeitsabstand wird der Verlauf der transmittierten Laserleistungsdichteverteilung außerhalb des Zentrums jedoch zunehmend unterschätzt, d. h. durch die Betrachtung der orts aufgelösten Transmissionsfunktion ist die transmittierte Laserstrahlung größer als durch Betrachtung mit einem konstanten Transmissionsgrad.

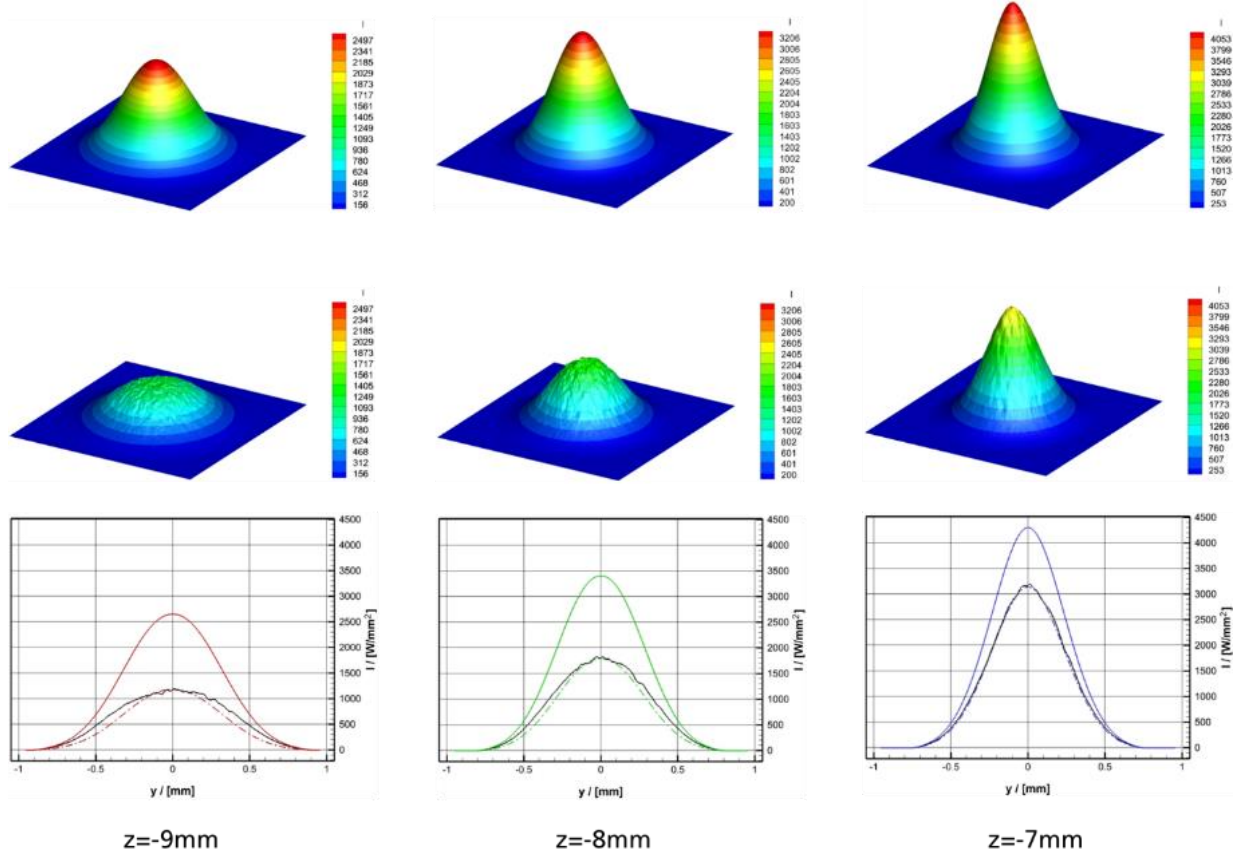


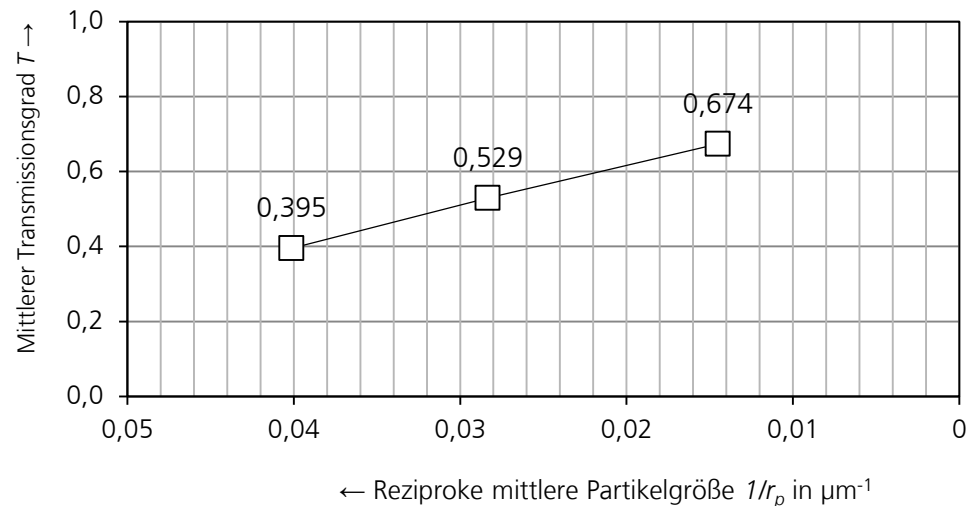
Bild 48 Jeweils für die Arbeitsabstände von $z = -9$ mm bis $z = -7$ mm (v. l. n. r.): Oben: modellierte, eingestrahelte Laserleistungsdichteverteilung in der jeweiligen Ebene. Mitte: transmittierte Laserleistungsdichteverteilung auf Basis der orts aufgelösten Abschattung in der jeweiligen Ebene. Unten: Durchgängige farbige Linie: Schnitt der modellierten, eingestrahelten Laserleistungsdichteverteilung, schwarze Linie: Schnitt der transmittierten Laserleistungsdichteverteilung auf Basis der orts aufgelösten Abschattung, Strich-Punkt-Linie: mit konstantem mittleren Transmissionsgrad berechnete transmittierte Laserleistungsdichteverteilung.

Der mittlere Transmissionsgrad wird daher nur für die Betrachtung des grundsätzlichen Verlaufes betrachtet. Für die Berechnung der Substrattemperaturverteilung (vgl. Kap. 6.3) wird stets die orts aufgelöste Transmissionsfunktion verwendet.

Einfluss der Partikelgröße/Kornfraktion

In Bild 49 ist der mittlere Transmissionsgrad T für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ für Kornfraktion KF1 bis KF3 dargestellt. Für Kornfraktion KF1 werden mit $T = 0,395$ die kleinsten und für die Kornfraktion KF3 mit $T = 0,674$ die größten mittleren Transmissionsgrade berechnet. Trotz abnehmender Partikelgeschwindigkeit bei zunehmendem mittlerem Korndurchmesser (vgl. Kap 5.2) steigt der mittlere Transmissionsgrad infolge des abnehmenden Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses nahezu linear an.

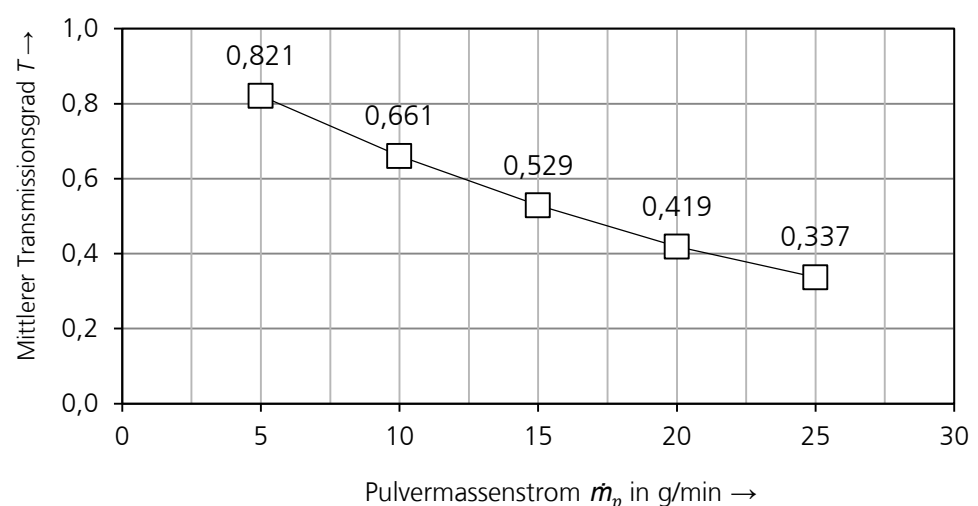
Bild 49
Mittlerer Transmissionsgrad T in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ in Ebene E8
Parameter:
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Pulvermassenstroms

In Bild 50 ist der mittlere Transmissionsgrad T für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ zwischen 5 g/min und 25 g/min abgebildet. Für einen Pulvermassenstrom von 5 g/min wird der größte mittlere Transmissionsgrad ($T = 0,821$) und für einen Pulvermassenstrom von 25 g/min der kleinste mittlere Transmissionsgrad ($T = 0,337$) berechnet. Die Abnahme des mittleren Transmissionsgrades ist bei gleichzeitiger Abnahme der mittleren Partikelgeschwindigkeit bei steigendem Pulvermassenstrom (vgl. Kap. 5.2) degressiv.

Bild 50
Mittlerer Transmissionsgrad T in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ in Ebene E8
Parameter:
KF2
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$

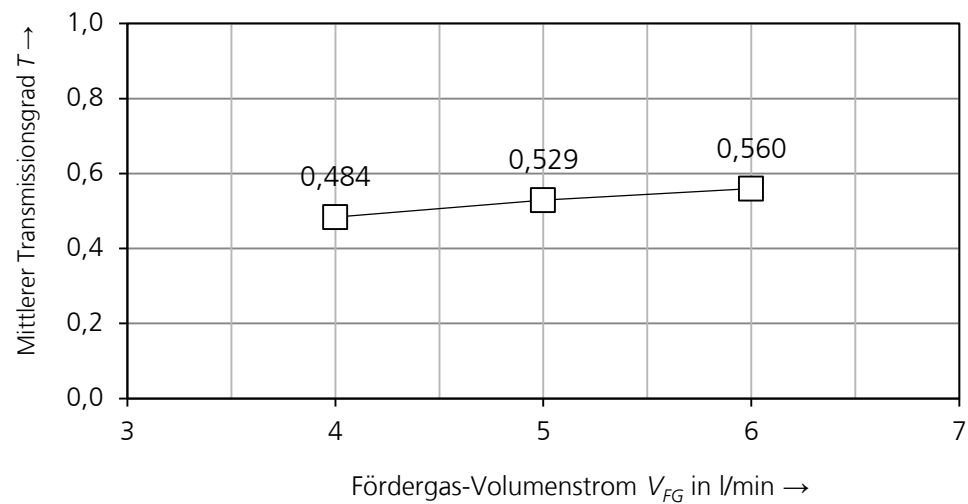


Einfluss des Fördergas-Volumenstroms

In Bild 51 ist der mittlere Transmissionsgrad T für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} zwischen 4 l/min und 6 l/min aufgetragen. Der mittlere Transmissionsgrad nimmt von $T = 0,484$ ($V_{FG} = 4 \text{ l/min}$)

auf bis zu $T = 0,560$ ($V_{FG} = 6$ l/min) infolge der zunehmenden Partikelgeschwindigkeit (vgl. Kap. 5.2) stetig zu.

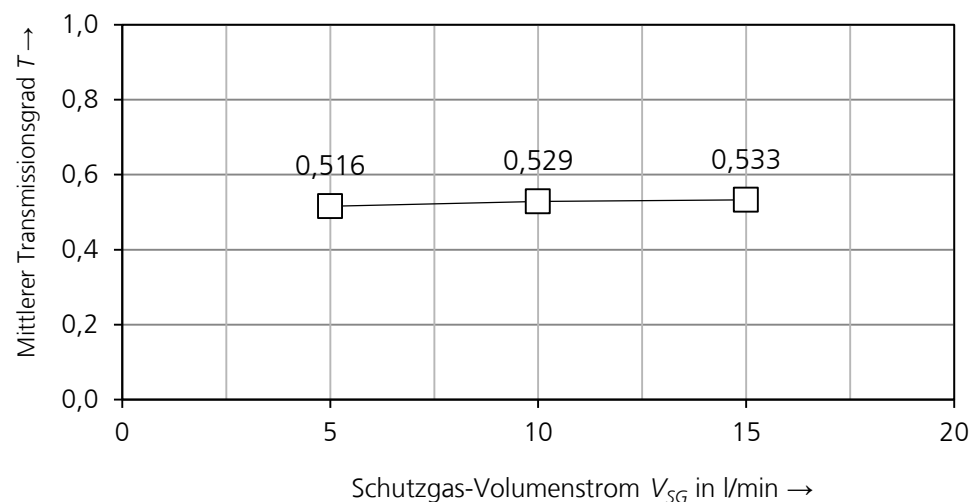
Bild 51
Mittlerer Transmissionsgrad T in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} in Ebene E8
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{SG} = 10$ l/min



Einfluss des Schutzgas-Volumenstroms

In Bild 52 ist der mittlere Transmissionsgrad T für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} zwischen 5 l/min und 15 l/min dargestellt. Der mittlere Transmissionsgrad nimmt trotz konstanter Partikelgeschwindigkeit (vgl. Kap. 5.2) infolge der unterschiedlichen Partikeldichteverteilungen bei zunehmendem Schutzgas-Volumenstrom von $T = 0,516$ ($V_{SG} = 5$ l/min) geringfügig auf bis zu $T = 0,533$ ($V_{SG} = 15$ l/min) zu.

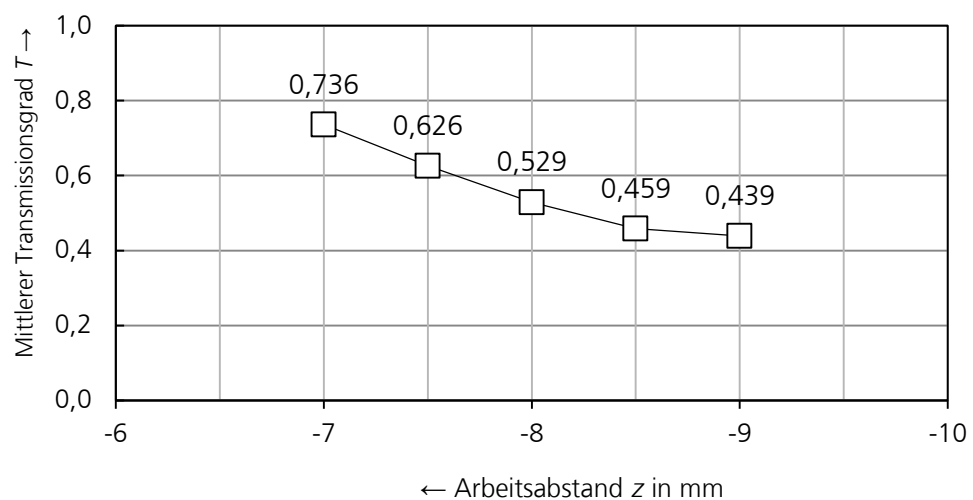
Bild 52
Mittlerer Transmissionsgrad T in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} in Ebene E8
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{FG} = 5$ l/min



Einfluss des Arbeitsabstandes

In Bild 53 ist der mittlere Transmissionsgrad T für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes zwischen $z = -7$ mm und $z = -9$ mm abgebildet. Der mittlere Transmissionsgrad wird bei Vergrößerung des Arbeitsabstandes respektive der Wechselwirkungsstrecke in der Strahlachse zunehmend kleiner. Dabei nimmt der Transmissionsgrad von $T = 0,736$ bei einem Arbeitsabstand von $z = -7$ mm stetig degressiv auf $T = 0,439$ bei einem Arbeitsabstand von $z = -9$ mm ab.

Bild 53
Mittlerer Transmissionsgrad T in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes z
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{FG} = 5$ l/min
 $V_{SG} = 10$ l/min



6.2 Partikeltemperaturverteilung

Die von den Pulverpartikeln absorbierte Laserleistung führt zu einem Temperaturanstieg und ggf. zum Schmelzen der Partikel. Analog zur Bestimmung der Transmissionsfunktion wurde eine Anzahl von $5 \cdot 10^5$ -Partikeln individuell betrachtet. Der Temperaturanstieg eines Partikels infolge der Wechselwirkung mit der eingestrahlten Laserstrahlung wurde durch die Integration der entlang der Trajektorie aufgenommenen Laserleistung mit Formel 2.1 ermittelt, wobei jedes Partikel mit der ortsabhängigen modellierten, transmittierten Laserstrahlungsintensität wechselwirkt. Für die Berechnung der Partikeltemperaturen wurde Reduktion der Partikelgeschwindigkeit in der Nähe der Bearbeitungsebene durch den Prallstrahl sowie die zusätzliche Erwärmung der Partikel durch den Anteil von der Substratoberfläche reflektierten Laserstrahlung vernachlässigt (vgl. Kap. 2.3). Insofern stellen die Ergebnisse bzgl. der erreichten Partikeltemperaturen eine untere Abschätzung dar. Die Zielgröße ist die orts aufgelöste Häufigkeitsverteilung der Partikeltemperaturen aller in einem finiten Flächenelement eintreffenden Partikel auf der Bearbeitungsebene. Die Integration wurde numerisch durchgeführt und der Transmissionsgrad zwischen den Messpunkten linear interpoliert. In Bild 54 ist berechnete Partikeltemperaturverteilung in Abhängigkeit der mittleren Korngröße für den Referenzparametersatz in Ebene E8 mit einer Laserleistung von 1500 W dargestellt.

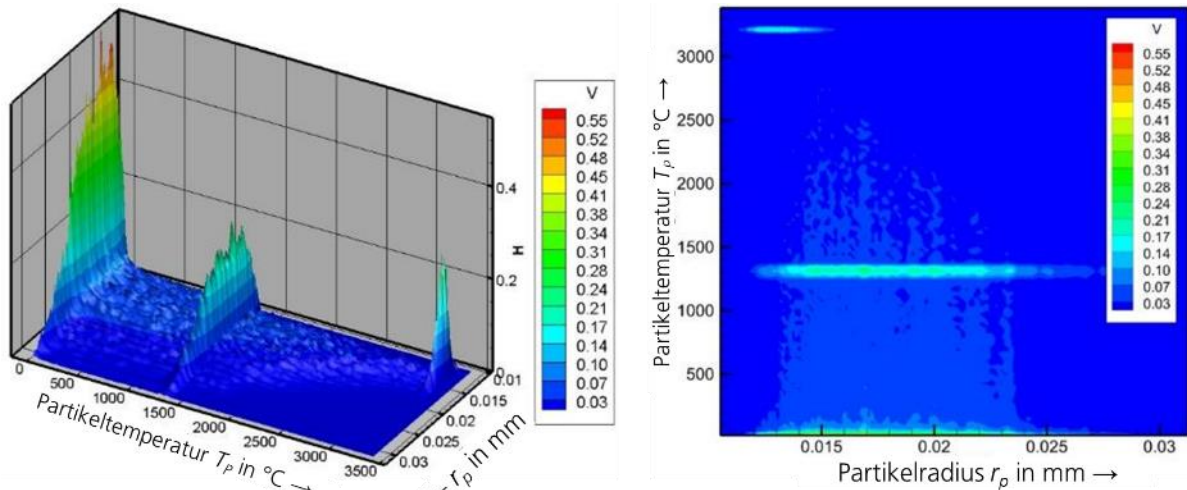
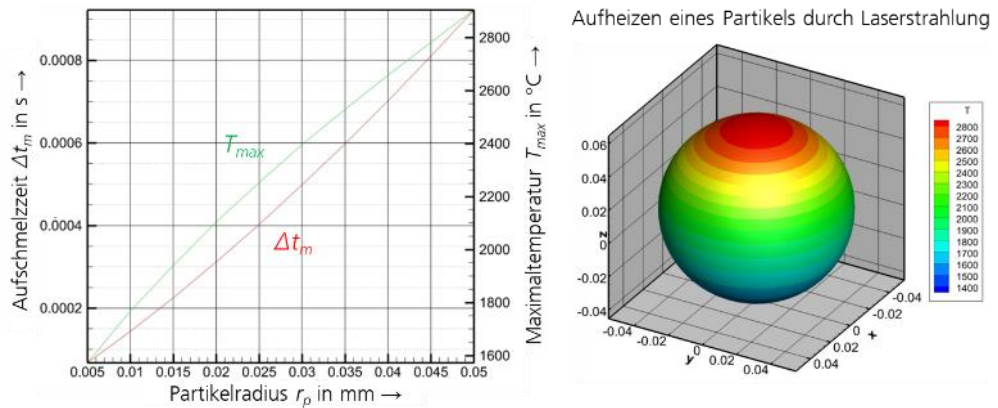


Bild 54 Links: Partikeltemperaturverteilung in Abhängigkeit der mittleren Korngröße in 3D-Ansicht in Ebene E8. Rechts: Partikeltemperaturverteilung in Abhängigkeit der mittleren Korngröße in Draufsicht. Anteil oberhalb Solidustemperatur ca. 41,10 %. Anteil Partikel oberhalb Verdampfungstemperatur ca. 0,50 %

Der Absorptionsgrad wird mit $A = 0,4$ angenommen [112]. Der Anteil von Partikeln oberhalb der Solidustemperatur beträgt ca. 41,10 %, der Anteil von Partikeln oberhalb der Verdampfungstemperatur beträgt etwa 0,50 %. Einige Partikel werden dabei aufgrund ihrer Trajektorie, unabhängig von der Partikelgröße, nicht oder nur in geringem Maße von der Laserstrahlung erwärmt. Die Temperatur einer Vielzahl der Partikel beträgt aufgrund der latenten Wärme, die zum vollständigen Aufschmelzen erforderlich ist, etwa 1300 °C (Schmelztemperatur von 2.4856 etwa 1290 °C bis 1350 °C). Die Verdampfungstemperatur wird dabei i. d. R. nur von kleinen Pulverpartikeln erreicht: hier etwa bei Korngrößen $r_p \leq 30 \mu\text{m}$. Dabei geht die Erwärmung der Partikel von der Oberfläche aus und wird durch Wärmeleitung durch das Volumen des Partikels geleitet. In Bild 55 ist rechts exemplarisch die Temperaturverteilung eines einzelnen ortsfesten, vollständig aufgeschmolzenen Pulverpartikels mit einem Partikelradius von $r_p = 50 \mu\text{m}$ in der Ebene E8 ohne Berücksichtigung der Abschattung ($T = 1$) bei einer Laserleistung von $P = 1500 \text{ W}$ im Strahlzentrum bei einem Absorptionsgrad von $A = 0,4$ abgebildet. Links abgebildet sind die Schmelzzeit Δt_m mit Angabe der Maximaltemperatur T_{max} in Abhängigkeit des Partikelradius. Die größten Partikeltemperaturen werden an der Oberseite der Oberfläche der Partikel erreicht. Da zum vollständigen Aufschmelzen des Pulverpartikels die Schmelztemperatur auch an der Unterseite des Partikels erreicht werden muss, ist die Differenz der Temperaturen zwischen Ober- und Unterseite umso größer, je größer das Partikel ist.

Bild 55

Links: Aufschmelzzeit (rot) und maximale Partikeltemperatur (grün) in Abhängigkeit des Partikelradius. Rechts: Temperaturverteilung eines Pulverpartikels mit Partikelradius $r_p = 50 \mu\text{m}$ in E8 ($T = 1$). Laserleistung $P_L = 1500 \text{ W}$ im Strahlzentrum



Durch die Zeitabhängigkeit der Wärmeleitung ist die Zeit für das vollständige Aufschmelzen umso größer, je größer das Partikel ist (vgl. Kap. 2.3). Die Schmelzzeiten für Partikel mit einem Korndurchmesser zwischen $10 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ betragen bei einer Laserleistung von $P = 1500 \text{ W}$ etwa $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ s} < \Delta t_m < 9 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ und Maximaltemperaturen von etwa $1600 \text{ °C} < T_{max} < 2900 \text{ °C}$. Unter realen Prozessbedingungen sind die erforderlichen Wechselwirkungszeiten zum vollständigen Aufschmelzen von der Partikeltrajektorie, der Abschattung der Laserstrahlung, der orts aufgelösten Laserstrahlintensität und ggf. einem Drall der Partikel abhängig. Wird an der Partikeloberfläche Verdampfungstemperatur erreicht, werden die Partikel infolge des Dampfdruckes beschleunigt. In Abhängigkeit der Richtung des Beschleunigungsvektors können Partikel hierbei von der ursprünglichen Trajektorie abgelenkt werden. In Bild 56 ist eine Sequenz von vier Einzelbildern einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme (Kamera Fa. VKT Video Kommunikation GmbH, Photron FASTCAM SA5) eines Pulver-Gas-Strahls dargestellt, bei dem einige Partikel durch die Wechselwirkung mit Laserstrahlung an der Partikeloberseite Verdampfungstemperatur erreichen. Jeweils in Kreisen (rot, grün und gelb) markiert sind drei Partikel. Während sich die rot und gelb markierten Partikel etwa gleich schnell mit konstanter Geschwindigkeit entlang ihrer Trajektorie bewegen, wird der grün markierte Partikel unter Rauchbildung auf eine signifikant größere Partikelgeschwindigkeit beschleunigt. Dies ist durch die innerhalb der Einzelbilder größere zurückgelegte Strecke gekennzeichnet. Infolge der Partikelbeschleunigung und -ablenkung werden auch der Transmissionsgrad, die weitere Temperaturerhöhung der Partikel sowie die kinetische Energie des Partikels beeinflusst, was in dem verwendeten Modellansatz bislang nicht berücksichtigt wird. Dabei ist davon auszugehen, dass die weitere Partikelerwärmung im Vergleich zur ursprünglichen Trajektorie infolge der geringeren Wechselwirkungszeit durch die größere Partikelgeschwindigkeit reduziert wird und der Transmissionsgrad zunimmt.

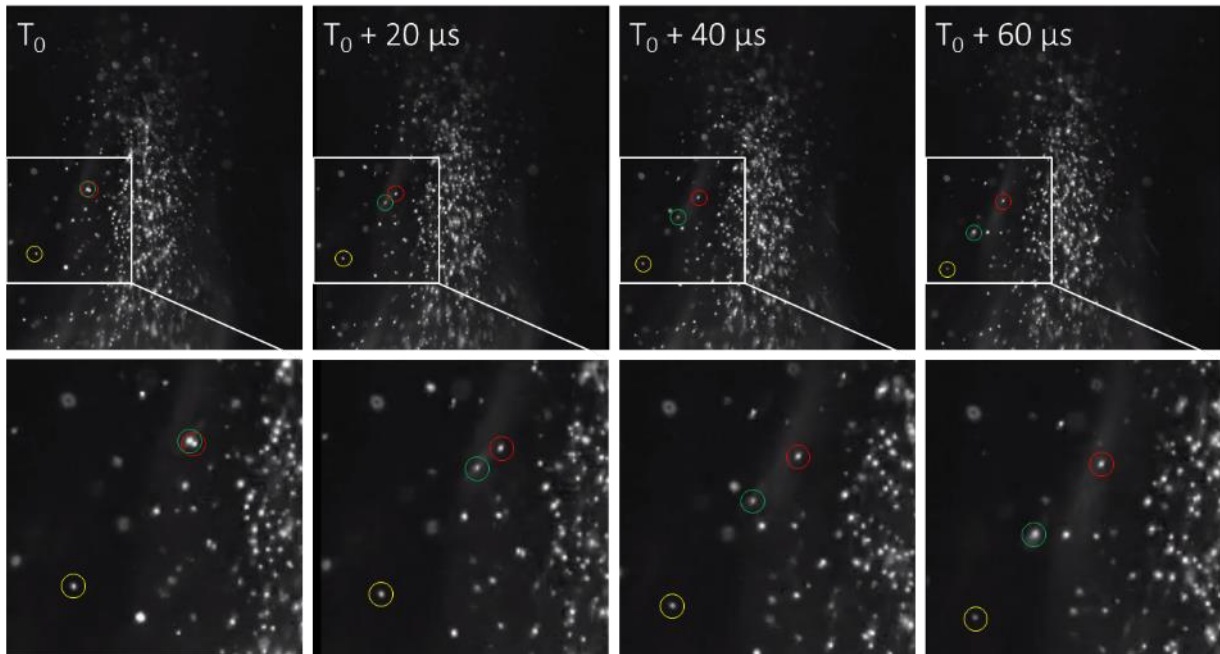
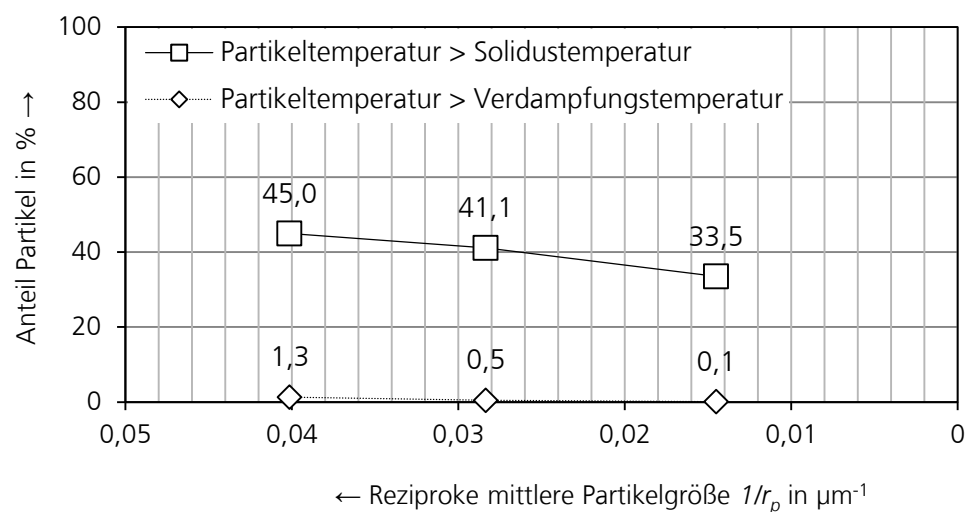


Bild 56 Sequenz von vier aufeinander folgenden Einzelbildern einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit 50.000 fps des belichteten Pulver-Gas-Frei-Strahls. Drei Partikel in rot, gelb und grün markiert. Das grün markierte Partikel wird infolge des Dampfdruckes bei Erreichen der Verdampfungstemperatur an der Partikeloberfläche beschleunigt.

Einfluss der Partikelgröße/Kornfraktion

In Bild 57 ist der Anteil von Partikeln oberhalb der Solidus- sowie oberhalb der Verdampfungstemperatur für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ für Kornfraktion KF1 bis KF3 in Ebene E8 aufgetragen.

Bild 57
Anteil der Partikel oberhalb der Solidus- und Verdampfungstemperatur in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$
Parameter:
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$

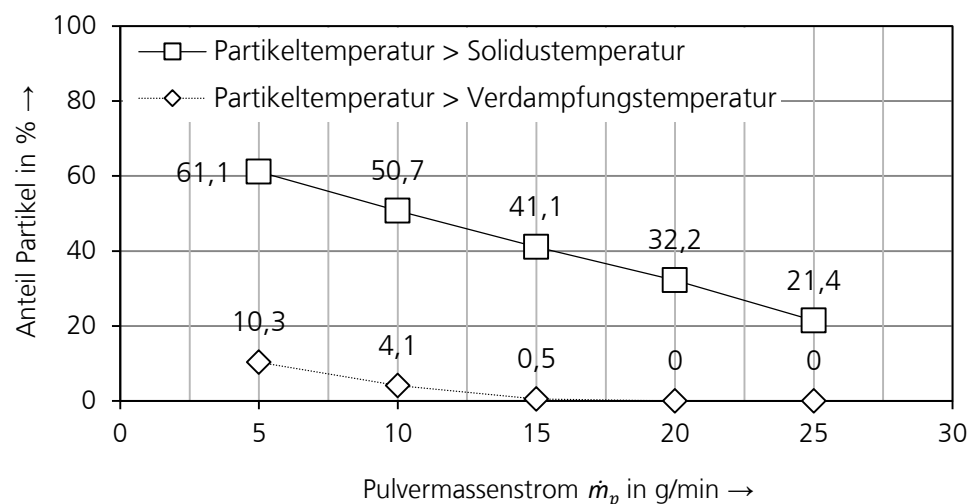


Dabei wird mit zunehmendem mittlerem Korndurchmesser – trotz abnehmender Partikelgeschwindigkeit respektive längerer Wechselwirkungszeit (vgl. Kap. 5.2) – von einer abnehmenden Partikelanzahl sowohl Solidus- als auch Verdampfungstemperatur erreicht. Dabei liegen die Anteile von Partikeln, die Solidustemperatur erreichen, zwischen 45 % (KF1) und 33,5 % (KF3). Die Verdampfungstemperatur an der Partikeloberfläche wird bei KF1 von 1,3 %, bei KF2 von 0,50 % und bei KF3 von 0,1 % der Partikel erreicht.

Einfluss des Pulvermassenstroms

In Bild 58 ist der Anteil von Partikeln oberhalb der Solidustemperatur sowie oberhalb der Verdampfungstemperatur für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ zwischen 5 g/min und 25 g/min für Ebene E8 dargestellt. Je größer der Pulvermassenstrom, desto kleiner ist der Transmissionsgrad (vgl. Kap. 6.1). Je kleiner der Transmissionsgrad, desto größer ist die abgeschattete Intensität der Laserstrahlung und infolgedessen desto geringer die Partikeltemperaturen. Trotz abnehmender Partikelgeschwindigkeit bei Vergrößerung des Pulvermassenstroms wird berechnet, dass bei zunehmendem Pulvermassenstrom infolge der Eigenabschattung durch einen abnehmenden Anteil der Pulverpartikel Solidus- und/oder Verdampfungstemperatur erreicht wird. Für einen Pulvermassenstrom von 5 g/min ($v_p \approx 5,298$ m/s, Bild 30; $T = 0,821$, Bild 50) wird von insgesamt etwa 61,1 % der Partikel mindestens Solidustemperatur und von etwa 10,3 % Verdampfungstemperatur erreicht. Bei einem Pulvermassenstrom von 25 g/min ($v_p \approx 4,755$ m/s, $T = 0,337$) wird von insgesamt etwa 21,4 % der Partikel Solidustemperatur und von < 0,1 % Verdampfungstemperatur erreicht.

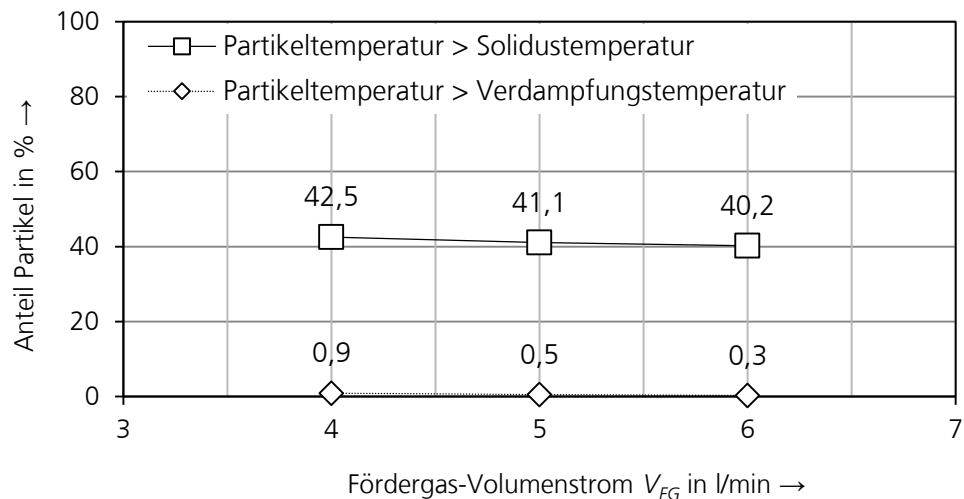
Bild 58
Anteil der Partikel oberhalb der Solidus- und Verdampfungstemperatur in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$
Parameter:
KF2
 $V_{FG} = 5$ l/min
 $V_{SG} = 10$ l/min



Einfluss des Fördergas-Volumenstroms

In Bild 59 ist der Anteil von Partikeln oberhalb der Solidus- sowie oberhalb der Verdampfungstemperatur für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} zwischen 4 l/min und 6 l/min aufgetragen. Bei abnehmendem Fördergas-Volumenstrom nimmt die Partikelgeschwindigkeit von 5,472 m/s (Fördergas-Volumenstrom: 6 l/min) auf 4,172 m/s (Fördergas-Volumenstrom: 4 l/min) ab (vgl. Bild 31). Dementsprechend wird der Transmissionsgrad von $T = 0,560$ auf $T = 0,484$ verringert (vgl. Bild 51). Bei einem Fördergas-Volumenstrom von 4 l/min wird von insgesamt etwa 42,5 % der Partikel, bei einem Fördergas-Volumenstrom von 6 l/min von ca. 40,2 % der Partikel mindestens Solidustemperatur erreicht. Gleichzeitig wird der Anteil von Partikeln, die Verdampfungstemperatur erreichen, von 0,9 % auf ca. 0,30 % verringert.

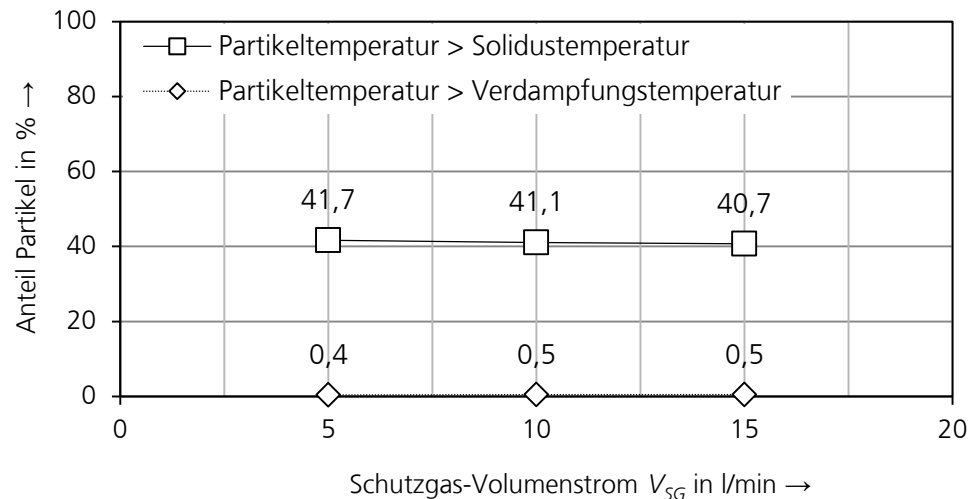
Bild 59
Anteil der Partikel oberhalb der Solidus- und Verdampfungstemperatur in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG}
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss des Schutzgas-Volumenstroms

In Bild 60 ist der Anteil von Partikeln oberhalb der Solidustemperatur sowie oberhalb der Verdampfungstemperatur für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} zwischen 5 l/min und 15 l/min dargestellt. Bei zunehmendem Schutzgas-Volumenstrom beträgt die Partikelgeschwindigkeit konstant 4,908 m/s (vgl. Bild 32). Infolge der Änderung der Partikeldichteverteilung wird der mittlere Transmissionsgrad von $T = 0,516$ auf $T = 0,533$ vergrößert (vgl. Bild 52). Damit nimmt der Anteil der Partikel, die mindestens auf Solidustemperatur erhitzt werden, bei Vergrößerung des Schutzgas-Volumenstroms von 5 l/min auf 15 l/min stetig von etwa 41,69 % auf ca. 40,68 % ab.

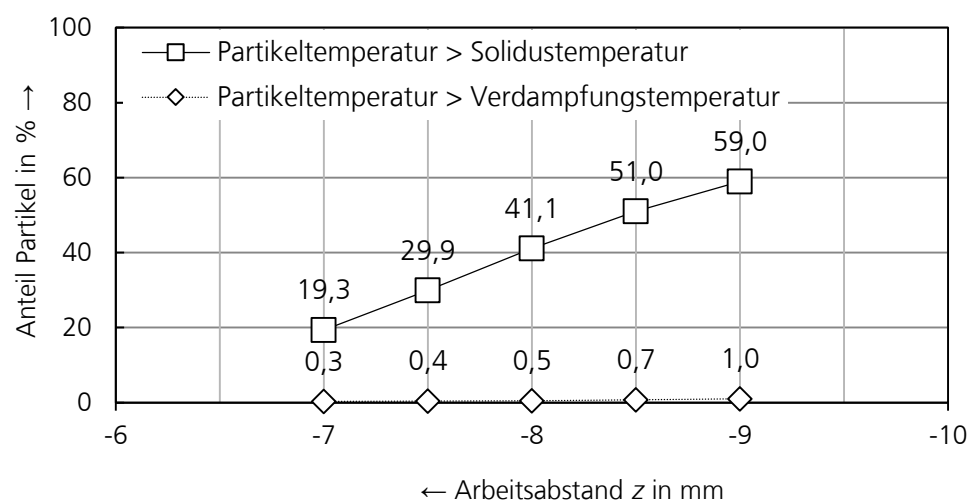
Bild 60
Anteil der Partikel oberhalb der Solidus- und Verdampfungstemperatur in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG}
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$



Einfluss des Arbeitsabstandes

In Bild 61 ist der Anteil von Partikeln oberhalb der Solidustemperatur sowie oberhalb der Verdampfungstemperatur für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes zwischen $z = -7$ und $z = -9$ mm abgebildet. Entsprechend dem Verlauf der Transmissionsfunktion (vgl. Bild 53) nimmt die Anzahl von Partikeln oberhalb der Solidustemperatur mit zunehmender Wechselwirkungsstrecke zu. Die Partikelgeschwindigkeit ist entsprechend des Modellansatzes über dem Arbeitsabstand konstant (vgl. Kap. 5.2). Für einen Arbeitsabstand $z = -7$ mm wird von insgesamt ca. 19,3 %, bei einem Arbeitsabstand von $z = -9$ mm von etwa 59,0 % eine Partikeltemperatur größer als Solidustemperatur erreicht. Der Anteil von Partikeln mit einer Temperatur größer als Verdampfungstemperatur nimmt bei einem Arbeitsabstand $z = -7$ mm von ca. 0,3 % auf etwa 1,0 % bei einem Arbeitsabstand von $z = -9$ mm zu.

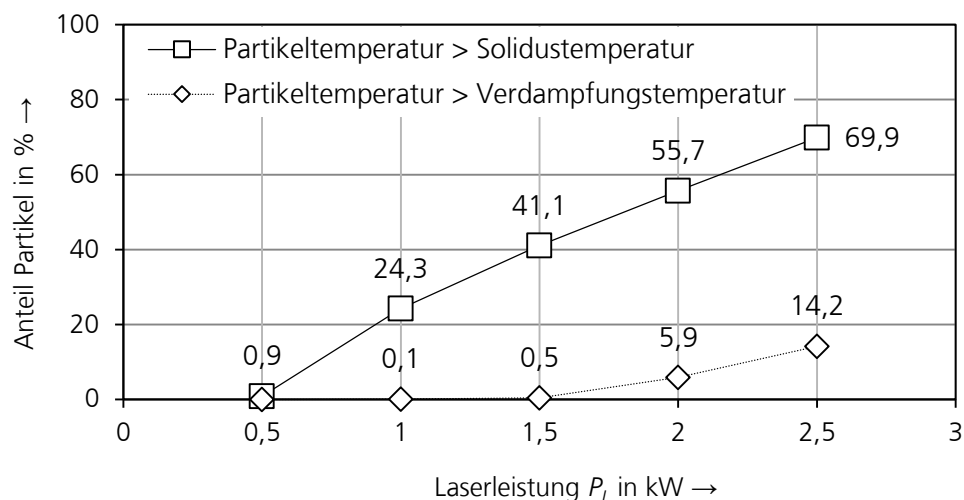
Bild 61
Anteil der Partikel oberhalb der Solidus- und Verdampfungstemperatur in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes z
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Einfluss der Laserleistung

In Bild 62 ist der Anteil von Partikeln oberhalb der Solidus- sowie oberhalb der Verdampfungstemperatur für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit der Laserleistung P_L zwischen 0,5 und 2,5 kW dargestellt. Bei einer Laserleistung von 500 W werden 0,9 % der Partikel mindestens auf Solidustemperatur erwärmt. Bei einer Laserleistung von 2500 W beträgt der Anteil 69,9 %. Bei Vergrößerung der Laserleistung nimmt der Anteil von Partikeln, die Verdampfungstemperatur erreichen, von < 0,01 % bei 500 W auf ca. 14,2 % bei 2500 W zu. Bei einem nicht vernachlässigbaren Anteil von Partikeln, die Temperaturen größer als Verdampfungstemperatur erreichen, ist davon auszugehen, dass die berechneten Werte für den Transmissionsgrad infolge der zunehmenden Partikelgeschwindigkeit zunehmend unterschätzt und für die erreichte Partikeltemperatur zunehmend überschätzt werden.

Bild 62
Anteil der Partikel oberhalb der Solidus- und Verdampfungstemperatur in Abhängigkeit der Laserleistung P_L
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$

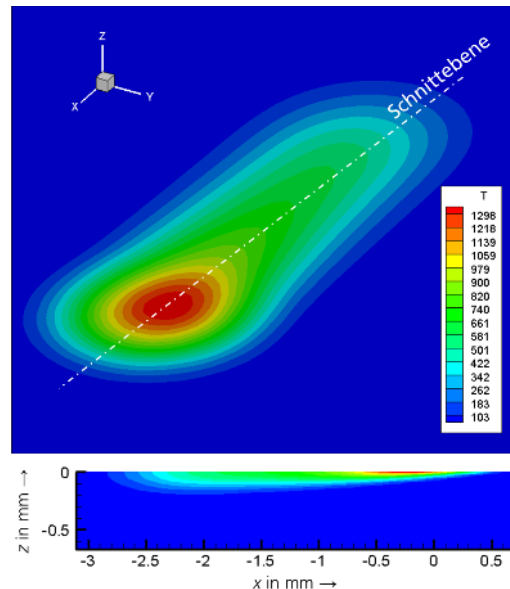


6.3 Substrattemperaturverteilung

Eingangsgröße zur Berechnung des Temperaturfeldes des Grundwerkstoffes ist die orts aufgelöste transmittierte Laserleistungsdichteverteilung (vgl. Kap. 6.1). Die Wärmeleitungsgleichung wurde numerisch mit Hilfe der FEM-Methode mit einem nach Temperaturgradienten angepassten bewegten FE-Netz auf Basis von Hexaeder-Elementen mit linearen Basisfunktionen gelöst [53]. In Bild 63 ist oben die Substrattemperaturverteilung für den Referenzparametersatz in perspektivischer Darstellung und rechts im Schnitt bei $y = 0$ im abgebildet. Bei Referenzeinstellungen wird lokal eine maximale Substrattemperatur von $T_S = 1380 \text{ °C}$ erreicht und damit keine Schmelze auf der Substratoberfläche erzeugt (Solidustemperatur von 1.4301: $T_M \approx 1400 \text{ °C}$). Aufgrund der geringen Wechselwirkungszeit bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min beträgt die Tiefe der Wärmeeinwirkung maximal wenige zehntel Millimeter (siehe Schnittdarstellung des Temperaturfeldes in Bild 63, unten).

Bild 63

Oben: perspektivische Darstellung der Substrattemperaturverteilung. Unten: Darstellung der Substrattemperaturverteilung bei $y = \text{konst.}$ Referenzparametersatz

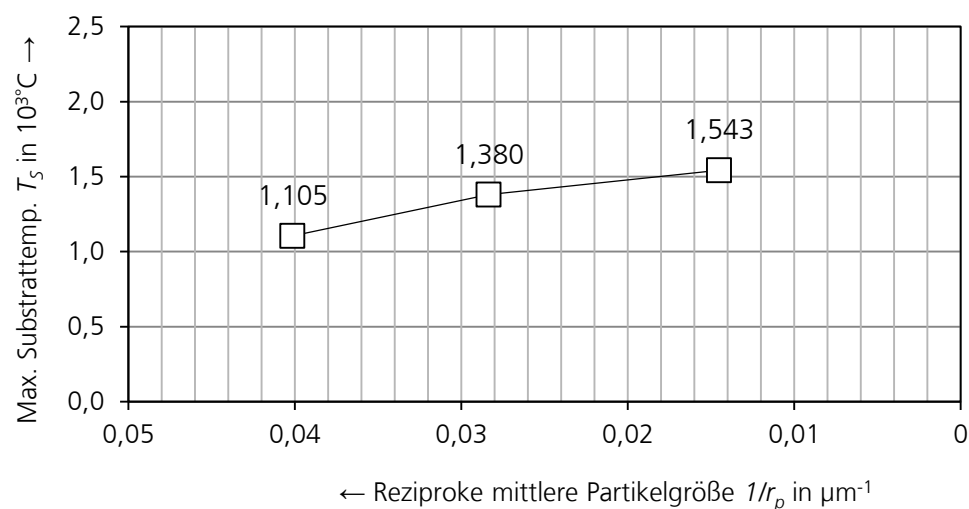


Einfluss der Partikelgröße/Kornfraktion

In Bild 64 ist die maximale Substrattemperatur T_S für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ für Kornfraktionen KF1 bis KF3 dargestellt. Für die Kornfraktion KF1 werden bei einem mittleren Transmissionsgrad von $T = 0,395$ die kleinsten ($1105\text{ °C} < T_M$) und für Kornfraktion KF3 mit $T = 0,674$ die größten maximalen Substrattemperaturen ($1543\text{ °C} > T_M$) berechnet. Die Abweichung gegenüber einem linearen Verlauf der maximalen Substrattemperatur bei einem nahezu linearen Verlauf des mittleren Transmissionsgrades ist durch die latente Wärme zum Aufschmelzen des Substrates von 1.4301 bei Temperaturen im Bereich von etwa $T_M \approx 1400\text{ °C}$ zu erklären.

Bild 64

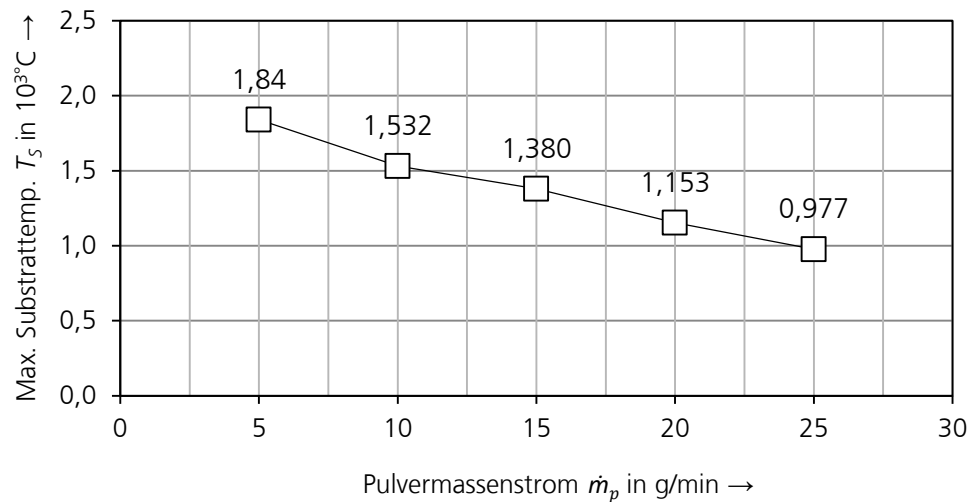
Max. Substrattemperatur T_S in Abhängigkeit des reziproken mittleren Korndurchmessers $1/r_p$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_v = 100\text{ m/min}$
Parameter:
 $\dot{m}_p = 15\text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5\text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10\text{ l/min}$



Einfluss des Pulvermassenstroms

In Bild 65 ist die maximale Substrattemperatur T_S für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ zwischen 5 g/min und 25 g/min aufgetragen. Aufgrund der Abnahme des mittleren Transmissionsgrades bei Vergrößerung des Pulvermassenstroms werden abnehmende maximale Substrattemperaturen mit Werten zwischen 1840 °C (5 g/min, $T = 0,821$) und 977 °C (25 g/min, $T = 0,337$) berechnet.

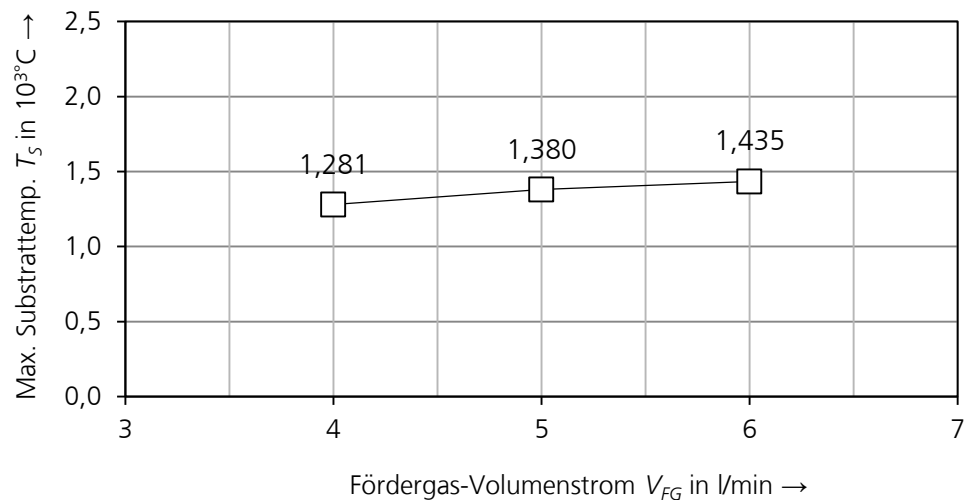
Bild 65
Max. Substrattemperatur T_S in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit $v_v = 100$ m/min
Parameter:
KF2
 $V_{FG} = 5$ l/min
 $V_{SG} = 10$ l/min



Einfluss des Fördergas-Volumenstroms

In Bild 66 ist die maximale Substrattemperatur T_S für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} zwischen 4 l/min und 6 l/min dargestellt. Die maximale Substrattemperatur beträgt zwischen 1281 °C (4 l/min, $T = 0,484$) und 1435 °C (6 l/min, $T = 0,560$).

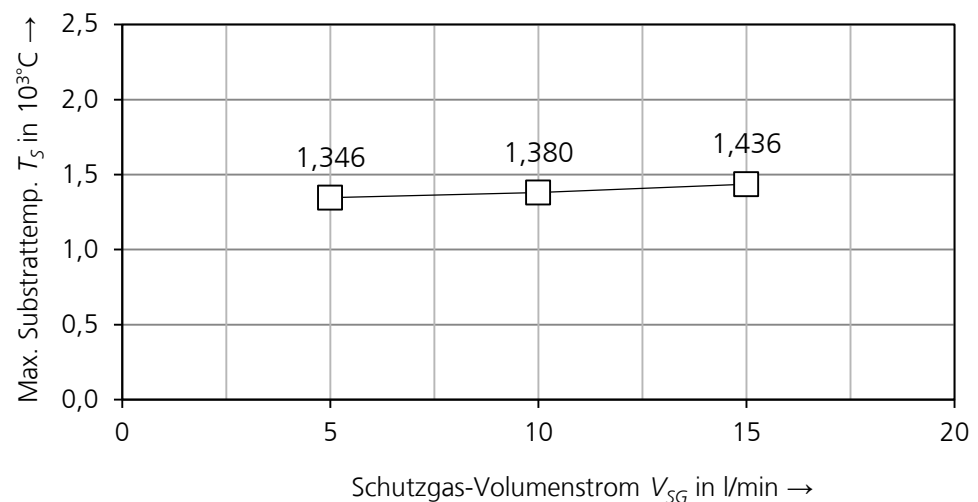
Bild 66
Max. Substrattemperatur T_S in Abhängigkeit des Fördergas-Volumenstroms V_{FG} bei einer Vorschubgeschwindigkeit $v_v = 100$ m/min
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{SG} = 10$ l/min



Einfluss des Schutzgas-Volumenstroms

In Bild 67 ist die maximale Substrattemperatur T_s für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} zwischen 5 l/min und 15 l/min abgebildet. Bei zunehmendem Schutzgas-Volumenstrom nimmt die maximale Substrattemperatur von 1346 °C (5 l/min, $T = 0,516$) auf etwa 1436 °C (15 l/min, $T = 0,533$) zu.

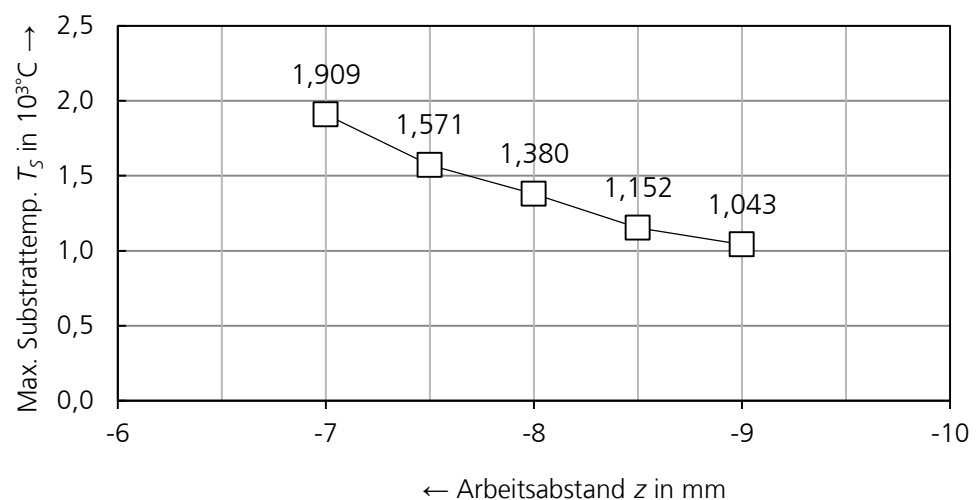
Bild 67
Max. Substrattemperatur T_s in Abhängigkeit des Schutzgas-Volumenstroms V_{SG} bei einer Vorschubgeschwindigkeit $v_v = 100$ m/min
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{FG} = 5$ l/min



Einfluss des Arbeitsabstandes

In Bild 68 ist die maximale Substrattemperatur T_s für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes zwischen $z = -7$ und $z = -9$ mm dargestellt. Der mittlere Transmissionsgrad nimmt bei Vergrößerung der Wechselwirkungsstrecke in der Strahlachse von $T = 0,736$ ($z = -7$ mm) auf bis zu $T = 0,439$ ($z = -9$ mm) ab, vgl. Bild 53.

Bild 68
Max. Substrattemperatur T_s in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes z bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_v = 100$ m/min
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{FG} = 5$ l/min
 $V_{SG} = 10$ l/min

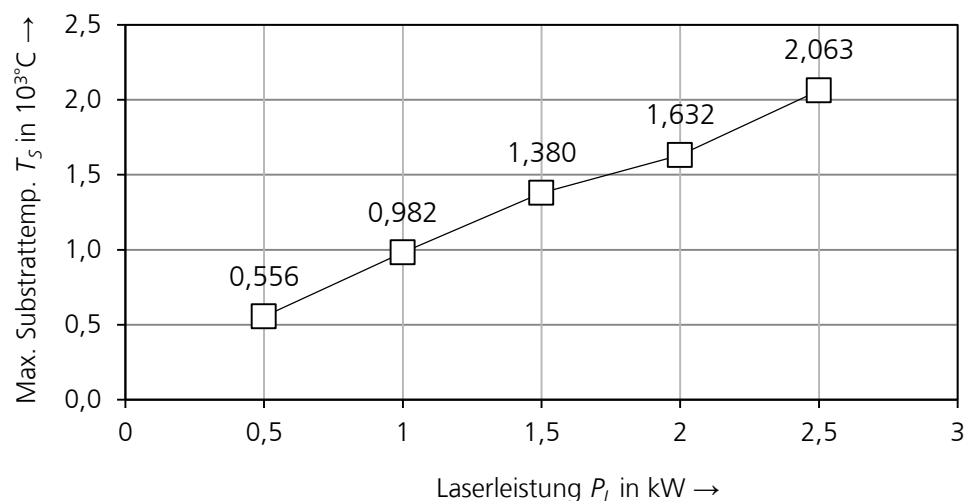


Gleichzeitig nehmen bei Verringerung des Arbeitsabstandes die Strahlfläche ab und damit die Laserstrahlungsintensität zu (vgl. Kap. 6.1). Demzufolge werden bei Verkleinerung des Arbeitsabstandes zunehmend größere maximale Substrattemperaturen berechnet. Dabei liegen die Werte zwischen 1909 °C bei einem Arbeitsabstand von $z = -7$ mm und 1043 °C bei einem Arbeitsabstand von $z = -9$ mm.

Einfluss der Laserleistung

In Bild 69 ist die maximale Substrattemperatur T_S für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit der Laserleistung P_L von 0,5 bis 2,5 kW aufgetragen. Der Transmissionsgrad ist bei gleichbleibenden Einstellungen für die Pulverförderung unabhängig von der Laserleistung ($T = 0,529$). Die berechneten maximalen Substrattemperaturen betragen zwischen 556 °C bei einer Laserleistung von 0,5 kW und bis 2063 °C bei einer Laserleistung von 2,5 kW.

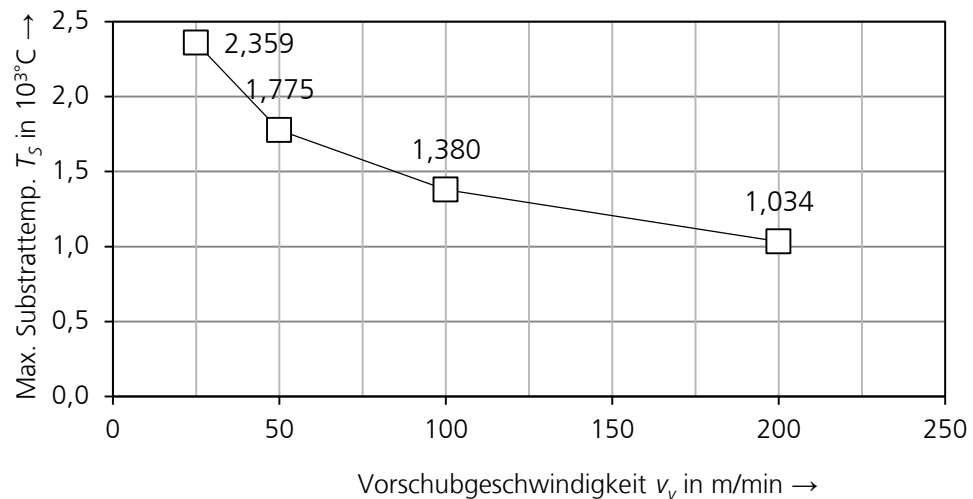
Bild 69
Max. Substrattemperatur T_S in Abhängigkeit der Laserleistung P_L bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_v = 100$ m/min
Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15$ g/min
 $V_{FG} = 5$ l/min
 $V_{SG} = 10$ l/min



Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

In Bild 70 ist die maximale Substrattemperatur T_S für die Referenzeinstellung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_v von 25 bis 200 m/min abgebildet. Der mittlere Transmissionsgrad ist bei gleichbleibenden Einstellungen für die Pulverförderung unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit ($T = 0,529$). Die berechnete maximale Substrattemperatur beträgt zwischen 2359 °C bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min und 1034 °C bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min. Aufgrund der Zeitabhängigkeit der Wärmeleitung nehmen bei Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit neben der maximalen Schmelzbadtemperatur insbesondere die Eindringtiefe des Temperaturfeldes und die Größe der Wärmeeinflusszone deutlich ab (siehe Kap. 7.1).

Bild 70
 Max. Substrattemperatur T_s in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_v
 Parameter:
 KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



6.4 Wärmeaustausch der Partikel mit der Substratoberfläche

In Abhängigkeit der Partikeltemperatur ist gemäß Formel 2.2, Kap. 2.4 der Term für den Temperatenausgleich zwischen Substratoberfläche und Pulverpartikeln in der Energiebilanz ein Quell- oder Verlustterm. Damit können zwei Fälle unterschieden werden:

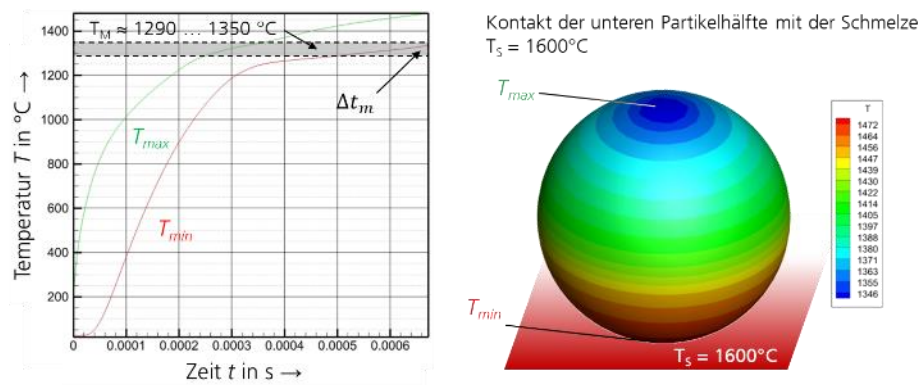
- 1) Die Partikeltemperatur T_p ist kleiner als die Schmelztemperatur ($T_s - T_p) > 0$:
 Die Partikel werden durch Aufnahme in eine durch die transmittierte Laserstrahlung erzeugte Schmelze erwärmt. Um die latente Wärme zum Aufschmelzen der Pulverpartikel bereitzustellen, muss die Temperatur des Schmelzbades auf der Substratoberfläche deutlich größer als die Schmelztemperatur des Zusatzwerkstoffes sein, hinreichend lange existieren, um die Partikel vollständig aufzuschmelzen, und ausreichend groß (Schmelzbadtiefe und -breite) sein, um die Partikel resorbieren zu können. Aufgrund der Zeitabhängigkeit der Wärmeleitung ist dafür eine gewisse Zeit erforderlich, die umso geringer ist, je größer die Schmelzbadtemperatur und/oder je kleiner die Korngröße ist (vgl. Kap. 2.3).
- 2) Die Partikeltemperatur T_p ist größer als die Schmelztemperatur ($T_s - T_p) < 0$:
 Im Falle von Partikeltemperaturen größer als Schmelztemperatur werden die Partikel beim Auftreffen auf die Substratoberfläche infolge der kinetischen Energie verformt bzw. angepresst und es wird ein Wärmekontakt hergestellt. Dadurch kann ein Wärmeaustausch der Partikel mit der festen Substratoberfläche initiiert werden. Das Substrat wird daher neben dem Energieeintrag durch die transmittierte Laserstrahlung durch geschmolzene Partikel erwärmt. Der Temperaturzuwachs an der Kontaktstelle des Partikels zum Substrat ist infolge der Wärmeleitung zeitabhängig und umso größer je größer die Partikelgröße und -temperatur ist.

Erwärmung der Partikel durch das Schmelzbad, $(T_s - T_p) > 0$

Die zeitaufgelöste Erwärmung von festen Pulverpartikeln bei Kontakt mit einer Schmelze wurde mit Hilfe der Wärmeleitungsgleichung berechnet. Für den Fall der Ablagerung eines Partikels mit einem Partikelradius von $25\text{ }\mu\text{m}$ an der Schmelzbadoberfläche mit einer Temperatur von $1600\text{ }^\circ\text{C}$ und einem Wärmeübergangskoeffizienten von $h = 0,5\text{ W/Kmm}^2$ sind in Bild 71 links die minimale (rote Linie, an der Partikeloberseite) und maximale Partikeltemperatur (grüne Linie, Kontaktpunkt mit der Schmelze) in Abhängigkeit der Wechselwirkungszeit und rechts die Partikeltemperaturverteilung abgebildet.

Bild 71

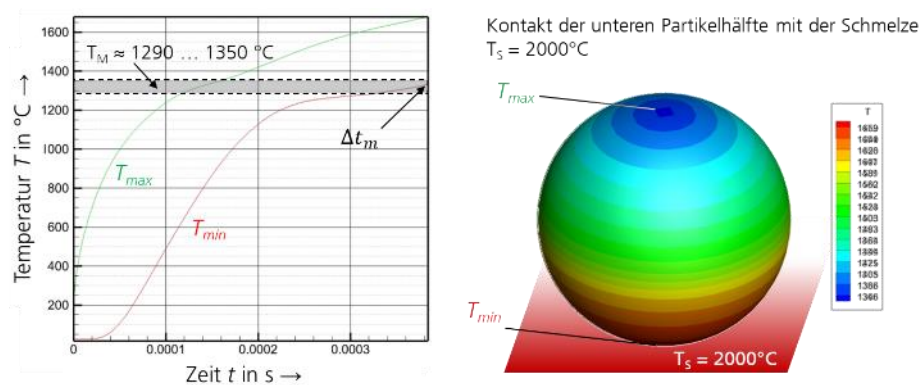
Links: minimale und maximale Partikeltemperatur in Abhängigkeit der Wechselwirkungszeit. Rechts: Partikeltemperaturverteilung. Partikelradius $r_p = 25\text{ }\mu\text{m}$, Schmelzbadtemperatur $T_s = 1600\text{ }^\circ\text{C}$



Der degressive Verlauf resultiert aus dem mit zunehmender Erwärmung abnehmenden Wärmeübertrag zwischen Schmelze und Partikel. Die latente Wärme verursacht einen Knick im Temperatur-Zeit-Verlauf im Bereich der Schmelztemperatur T_M von 2.4856 bei etwa $1290\text{ }^\circ\text{C}$ bis $1350\text{ }^\circ\text{C}$. Bis durch das Partikel auch an der Partikeloberseite Schmelztemperatur erreicht wird, ist eine Zeit von etwa $\Delta t_m = 6,7 \cdot 10^{-4}\text{ s}$ erforderlich. In Bild 72 ist links die minimale (an der Partikeloberseite) und maximale Partikeltemperatur (Kontaktpunkt mit der Schmelze) in Abhängigkeit der Wechselwirkungszeit und rechts die Partikeltemperaturverteilung für den Kontakt eines Partikels mit einem Partikelradius von $25\text{ }\mu\text{m}$ an einer Schmelzbadoberfläche mit einer Temperatur von $2000\text{ }^\circ\text{C}$ und einem Wärmeübergangskoeffizienten von $h = 0,5\text{ W/Kmm}^2$ dargestellt.

Bild 72

Links: minimale und maximale Partikeltemperatur in Abhängigkeit der Wechselwirkungszeit. Rechts: Partikeltemperaturverteilung. Partikelradius $r_p = 25\text{ }\mu\text{m}$, Schmelzbadtemperatur $T_s = 2000\text{ }^\circ\text{C}$



Durch die größere Schmelzbadtemperatur wird die Zeit zum vollständigen Aufschmelzen der Pulverpartikel auf etwa $\Delta t_m = 3,8 \cdot 10^{-4}$ s verringert. In Bild 73 sind die Aufschmelzzeiten für den Kontakt eines Partikels an einer Schmelzbadoberfläche in Abhängigkeit des Partikelradius für unterschiedliche Partikeltemperaturen (links: 25 °C, Mitte: 500 °C, rechts: 1000 °C) und Schmelzbadtemperaturen (rot: 1600 °C, grün: 2000 °C, blau: 2400 °C, schwarz: 2800 °C und gelb: 3200 °C) bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von $h = 0,5 \text{ W/Kmm}^2$ aufgetragen. Die Aufschmelzzeit für ein Partikel ist dabei umso geringer, je kleiner der Partikelradius, je größer die Schmelzbadtemperatur und je größer die Partikeltemperatur vor Kontakt mit der Schmelze ist.

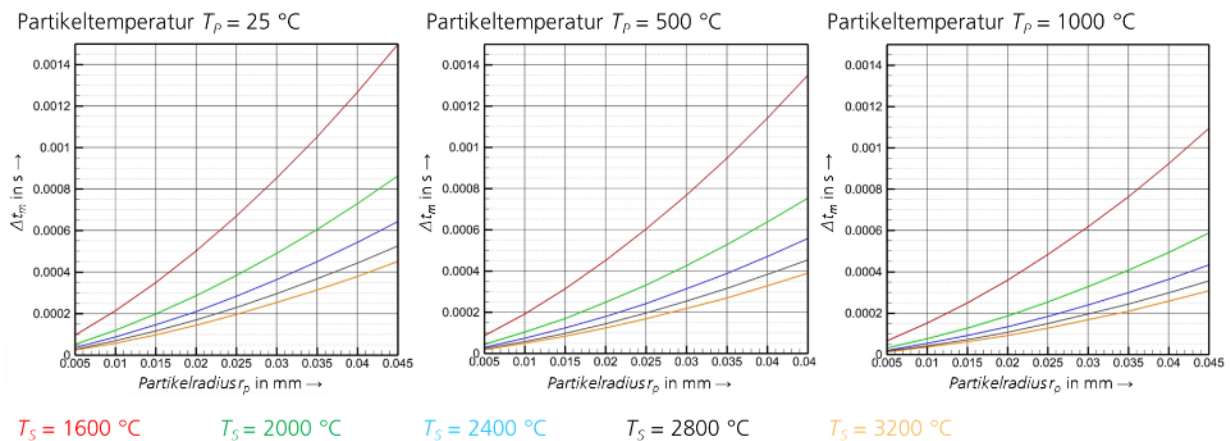


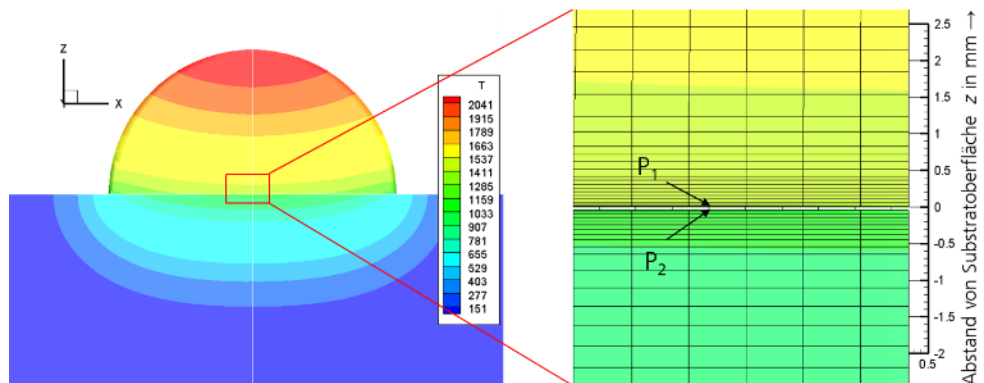
Bild 73 Aufschmelzzeiten in Abhängigkeit des Partikelradius für unterschiedliche Partikel- und Schmelzbadtemperaturen

Für ein Partikel mit einem Partikelradius von 25 μm kann demnach die Aufschmelzzeit von $\Delta t_m = 6,7 \cdot 10^{-4}$ s bei einer Partikeltemperatur von 25 °C und einer Schmelzbadtemperatur von 1600 °C auf etwa $\Delta t_m = 1,3 \cdot 10^{-4}$ s bei einer Partikeltemperatur von 1000 °C und einer Schmelzbadtemperatur von 3200 °C verringert werden. Für das konventionelle LA ist es möglich, die maximal erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten anhand der erforderlichen Zeit zum Aufschmelzen der Partikel und der Existenzdauer der Schmelze abzuschätzen. Die obere Grenze stellt die Schmelzbadlänge in Richtung des Vorschubs dar. Partikel, die seitlich in die Schmelze geführt werden, haben entsprechend eine kürzere Wechselwirkungszeit, um vollständig aufgeschmolzen zu werden. Beträgt bspw. außerhalb des Strahlzentrums die zur Wechselwirkung zur Verfügung stehende Schmelzbadlänge in Fahrtrichtung 0,2 mm und die Schmelzbadtemperatur im Mittel 1600 °C, können Partikel mit einem Partikelradius $\leq 25 \mu\text{m}$ und einer Partikeltemperatur von 25 °C maximal bei Vorschubgeschwindigkeiten von ca. 17,9 m/min aufgeschmolzen werden. Bei Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit können diese Partikel dann nur vollständig durch das Schmelzbad aufgeschmolzen werden, wenn sie bereits vorgewärmt werden.

Erwärmung des Substrates durch aufgeschmolzene Partikel, $(T_S - T_P) < 0$

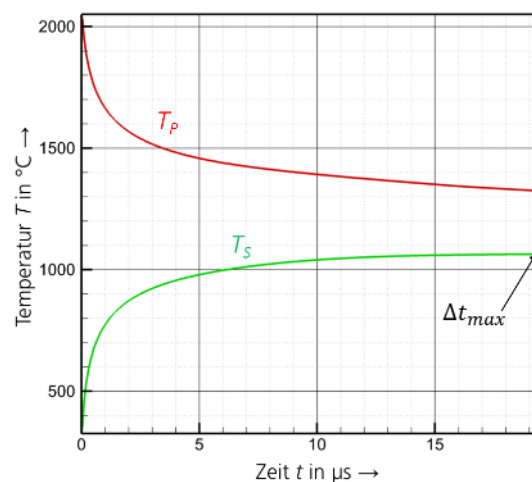
Der Anstieg der Substrattemperatur an der Kontaktstelle infolge des Wärmeübergangs von einem geschmolzenen Partikel auf das Substrat ist zeitabhängig. In Bild 74 ist eine Momentaufnahme nach einer Dauer von $\Delta t_{\max} = 1,95 \cdot 10^{-5}$ s der zeitabhängigen Lösung der Wärmeleitungsgleichung beim Wärmeübergang an der Kontaktstelle zwischen einem angespressten, schmelzflüssigen Partikel mit einem Partikelradius von $25 \mu\text{m}$ und einer homogenen Temperatur von 2200°C mit dem Substrat mit einer Temperatur von 25°C und einem Wärmeübergangskoeffizienten von $h = 0,5 \text{ W/Kmm}^2$ abgebildet. Zu diesem Zeitpunkt wird die maximale Substrattemperatur erreicht.

Bild 74
Wärmeübergang an der Kontaktstelle zwischen schmelzflüssigem Partikel mit einer Temperatur von $T_P = 2200^\circ\text{C}$ und Substrat bei $T_S = 25^\circ\text{C}$. Partikelradius $r_p = 25 \mu\text{m}$. Zeitpunkt $\Delta t_{\max} = 1,95 \cdot 10^{-5} \text{ s}$



In Bild 75 ist der Temperaturverlauf von einem Substrat (grün) mit einer Substrattemperatur von 25°C , einem Pulverpartikel (rot) mit einem Partikelradius von $25 \mu\text{m}$ und einer Partikeltemperatur von 2200°C in Abhängigkeit der Wechselwirkungszeit dargestellt. Die maximale Substrattemperatur, ausgehend von einer Ausgangstemperatur von 25°C , beträgt, infolge des Wärmeeintrags durch das schmelzflüssige Partikel, lokal nach etwa $\Delta t_{\max} = 1,95 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ ca. 1064°C .

Bild 75
Temperaturverlauf von Substrat (grün) und Pulverpartikel (rot) in Abhängigkeit der Wechselwirkungszeit. Partikelradius $r_p = 25 \mu\text{m}$, Substrattemperatur $T_S = 25^\circ\text{C}$, Partikeltemperatur $T_P = 2200^\circ\text{C}$



In Bild 76 ist links der Temperaturzuwachs dT durch ein geschmolzenes Pulverpartikel im Substrat an der Kontaktstelle und rechts die Zeit zum Erreichen der Maximaltemperatur $\Delta t_{\max,s}$ an der Substratoberfläche an der Kontaktstelle als Funktion des Partikelradius und der Partikeltemperatur abgebildet. Je größer das Pulverpartikel und je größer die Partikeltemperatur, desto größer ist der Temperaturzuwachs an der Kontaktstelle des Partikels zum Substrat.

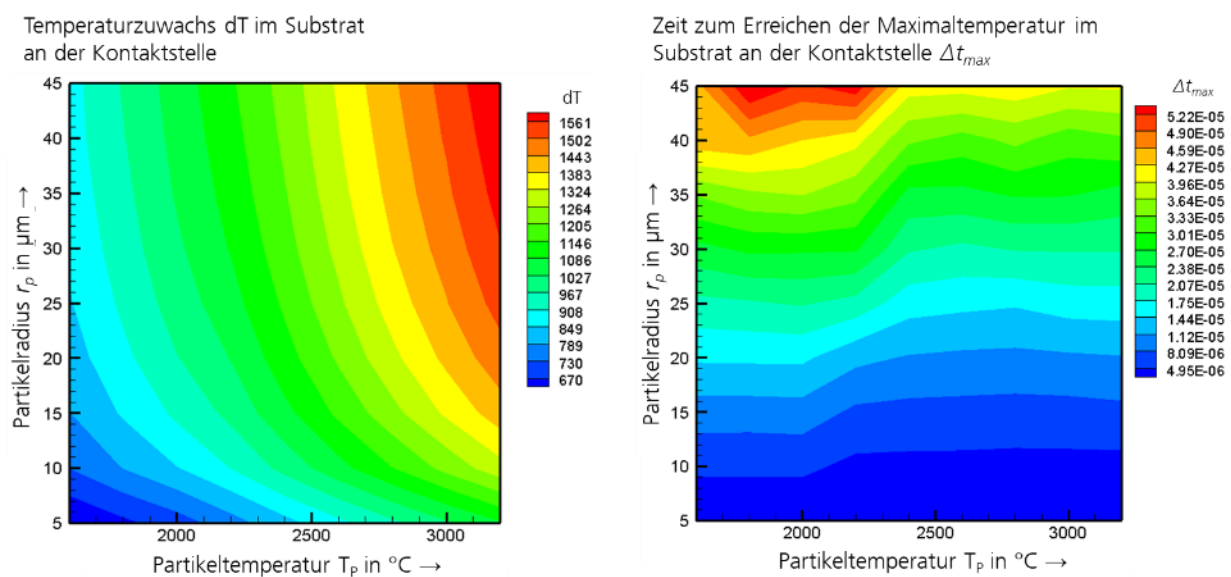


Bild 76 Links: Temperaturzuwachs dT durch ein erwärmtes Pulverpartikel im Substrat an der Kontaktstelle in Abhängigkeit der Partikeltemperatur. Rechts: Zeit zum Erreichen der Maximaltemperatur im Substrat an der Kontaktstelle in Abhängigkeit der Partikeltemperatur

Die Zeit zum Erreichen der Maximaltemperatur im Substrat ist dabei insbesondere von der Partikelgröße und nur in geringerem Maße von der Partikeltemperatur abhängig. Diese ist umso größer, je größer das Pulverpartikel ist. Einen hinreichenden Energieeintrag zum Aufschmelzen bzw. der Ausbildung eines metallurgischen Verbundes an der Kontaktstelle der Partikel zum Substrat bei nicht vorgewärmtem Substrat kann demnach nur durch größere Partikel mit einem Partikeldurchmesser größer als etwa $30\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Temperatur nahe der Verdampfungstemperatur erreicht werden. Für kleinere Partikel muss das Substrat bereits ausreichend durch die transmittierte Laserstrahlung vorgewärmt sein, um lokal die Schmelztemperatur an der Kontaktstelle zu erreichen. Insgesamt sind die Aufschmelzzeiten beim Wärmeübergang von schmelzflüssigen Partikeln zum festen Substrat gegenüber dem Erwärmen fester Partikel durch das Schmelzbad bei gleichem Partikelradius in Abhängigkeit der vorliegenden Partikel- und Schmelzbadtemperatur bis zu etwa einem Faktor 6 bis 35 geringer.

6.5 Zwischenfazit

Mit dem entwickelten auf Messdaten basierenden Modell für die Werkzeuge können die prozessrelevanten Einflussgrößen für das EHLA-Verfahren (Transmissionsgrad, Partikelerwärmung im Strahlengang, Erwärmung des Substrats und Wärmeaustausch der Partikel mit der Substratoberfläche) in Abhängigkeit der Einstellungen für die Pulverförderung (Pulverkornfraktion, Förder- und Schutzgas-Volumenstrom, Pulvermassenstrom), des Arbeitsabstandes, der Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit beschrieben werden. Für den Referenzparametersatz beträgt der Transmissionsgrad $T = 0,529$ und der Anteil der Partikel oberhalb Solidustemperatur 41,1 %, wovon 0,5 % Temperaturen oberhalb der Verdampfungstemperatur erreichen. Das Substrat wird bei einer Laserleistung von 1500 W nicht aufgeschmolzen. Die Ergebnisse zum Einfluss der Änderung eines Verfahrensparameters gegenüber dem Referenzparametersatz auf Transmissionsgrad, Partikel- und Substrattemperatur im untersuchten Verfahrensparameterbereich zwischen Minimal- und Maximalwert sind in Tabelle 5 mit Angabe der Änderungsrichtung bei Vergrößerung eines Verfahrensparameters durch Pfeile zusammenfassend dargestellt.

Verfahrensparameter	Min.	Ergebnisse				
	Max.	TG [%]		PT [% > Sol.-T Verd. T]		ST [°C]
Kornfraktion in μm	-45+11	0,395	▲	45,0 1,30	▼	1105
	-90+45	0,674		33,5 0,10		1543
Pulvermassenstrom in g/min	5	0,821	▼	61,1 10,3	▼	1840
	25	0,337		21,4 0,00		977
Fördergas-Volumenstrom in l/min	4	0,484	▲	42,5 0,91	▼	1281
	6	0,560		40,2 0,30		1435
Schutzgas-Volumenstrom in l/min	5	0,516	▲	41,7 0,39	▼	1346
	15	0,533		40,7 0,48		1436
Arbeitsabstand in mm	-7	0,736	▼	19,3 0,30	▲	1909
	-9	0,439		59,0 1,00		1043
Laserleistung in kW	0,5	---	---	0,90 0,00	▲	556
	2,5	---		69,9 14,2		2063
Vorschubgeschwindigkeit in m/min	25	---	---	---	---	2359
	200	---		---		1034

Tabelle 5 Einfluss der Änderung der Verfahrensparameter auf Transmissionsgrad TG, Partikeltemperatur PT und Substrattemperatur ST im untersuchten Verfahrensparameterbereich zwischen Minimal- und Maximalwert. Angabe der Änderungsrichtung bei Vergrößerung eines Verfahrensparameters durch Pfeile

Aus diesen gewonnenen Erkenntnissen lassen sich gezielt Maßnahmen zur Steuerung des Energieeintrages in die Pulverpartikel sowie das Substrat ableiten. Wird beispielsweise angenommen, dass der Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur reduziert und gleichzeitig der Energieeintrag in das Substrat

vergrößert werden soll, wäre eine Möglichkeit, den Pulvermassenstrom zu reduzieren. Ist in einem weiteren Beispiel das Ziel, die maximale Temperatur im Substrat bei gleicher Partikelerwärmung zu verringern, wäre ein Ansatzpunkt, gemäß Tabelle 5, die Vorschubgeschwindigkeit zu vergrößern.

Ableitung einer neuartigen Prozessführungsstrategie für das EHLA

Auf Basis des gesteigerten Prozessverständnisses für die Spurbildung beim EHLA-Verfahren können in Abhängigkeit der Partikel- und Substrattemperatur drei Prozessführungen unterschieden werden, bei denen die zur Verfügung gestellte Prozesswärme ausreicht, um eine defektfreie Schicht mit schmelzmetallurgischem Verbund herzustellen: das konventionelle LA, das EHLA-Verfahren sowie eine neuartige, im Rahmen dieser Arbeit erstmalig beschriebene Prozessvariante, das Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserschmelzspritzen (MELT-X), schematisch abgebildet in Bild 77.

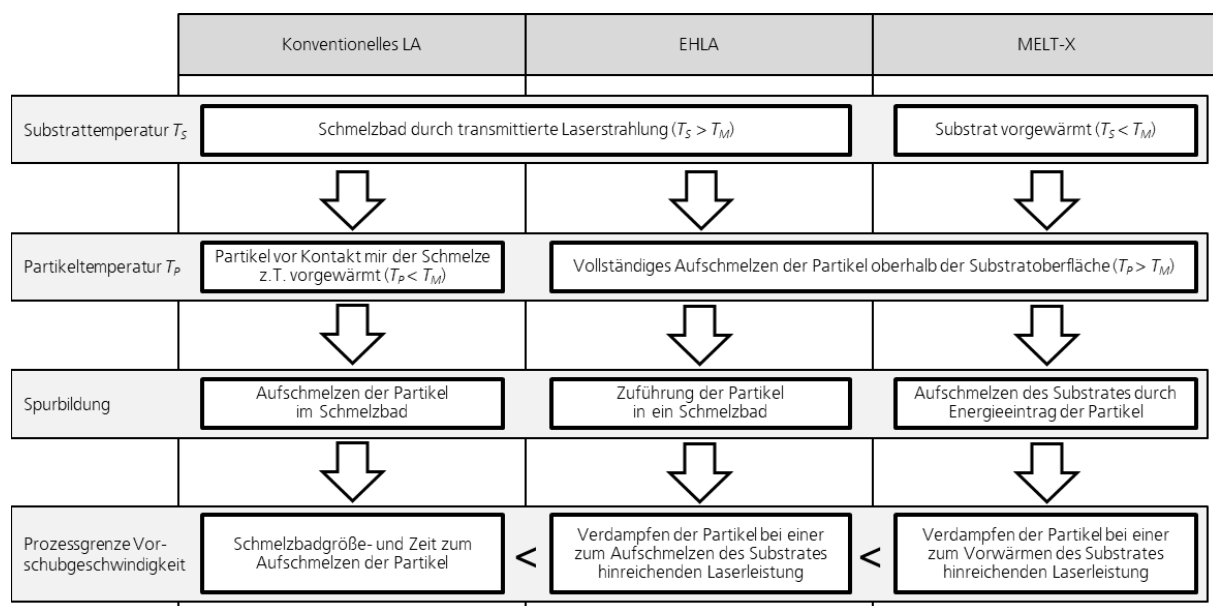


Bild 77 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Prozessführungen in Abhängigkeit der Partikel- und Substrattemperatur sowie der Spurbildung mit Angabe der Prozessgrenze.

Beim konventionellen LA wird das Substrat durch die transmittierte Laserstrahlung aufgeschmolzen, d. h. die Substrattemperatur T_S ist größer als die Schmelztemperatur T_M ($T_S > T_M$). Die Partikeltemperatur T_P ist vor Eintreffen in das Schmelzbad i. d. R. deutlich kleiner als die Schmelztemperatur T_M ($T_P < T_M$). Die Grenze für die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit ist hierbei einerseits durch die Schmelzbadgröße zur Aufnahme der Pulverpartikel im Schmelzbad sowie andererseits durch die erforderliche Zeit für das vollständige Aufschmelzen der Pulverpartikel vorgegeben.

Beim EHLA-Verfahren wird an der Substratoberfläche mindestens Schmelztemperatur erreicht ($T_S > T_M$). Dazu ist in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und des Transmissionsgrades eine bestimmte Laserleistung erforderlich, die umso größer ist, je größer die Vorschubgeschwindigkeit. Der überwiegende Anteil der Partikel wird oberhalb der Substratoberfläche durch die Laserstrahlung vollständig aufgeschmolzen ($T_P > T_M$). Durch den Energieeintrag der schmelzflüssigen Partikel wird das Substrat zusätzlich erwärmt. Dadurch können auch Partikel, die außerhalb der Schmelze auf die vorgewärmte Substratoberfläche treffen, einen schmelzmetallurgischen Verbund ausbilden und damit zur Spurbildung beitragen. Daher wird beim EHLA-Verfahren, anders als beim konventionellen LA, keine bestimmte Größe des Schmelzbades vorausgesetzt, wodurch die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit gesteigert werden kann. Wird die Laserleistung entsprechend vergrößert, wird der Energieeintrag in die Pulverpartikel und damit der Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur vergrößert. Die Grenze bzgl. der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit beim EHLA-Verfahren ist dabei durch das Verdampfen eines Großteils der Partikel bei einer zum Aufschmelzen des Substrates hinreichenden Laserleistung vorgegeben.

Beim MELT-X werden die Partikel ebenfalls oberhalb der Substratoberfläche vollständig aufgeschmolzen ($T_P > T_M$), jedoch ist die Substrattemperatur vor Kontakt der schmelzflüssigen Partikel kleiner als Schmelztemperatur ($T_S < T_M$). Um damit defektfreie Schichten herzustellen, muss das Substrat durch den transmittierten Strahlungsanteil so weit vorgewärmt werden, dass der Energieeintrag geschmolzener Pulverpartikel ausreichend ist, um selbst bei einem festen, noch nicht geschmolzenen Substrat eine schmelzmetallurgische Verbindung an der Oberfläche auszubilden. Da beim MELT-X gegenüber dem EHLA-Verfahren bei ansonsten gleichen Voraussetzungen (Transmissionsgrad, Partikelerwärmung etc.) geringere Laserleistungen benötigt werden, kann die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit weiter vergrößert und die bisherige Prozessgrenze beim EHLA-Verfahren überwunden werden. Die Grenze beim MELT-X besteht daher darin, dass bei einer zum Vorwärmen des Substrates hinreichenden Laserleistung die Verdampfungstemperatur eines zu großen Anteils der Pulverpartikel überschritten wird.

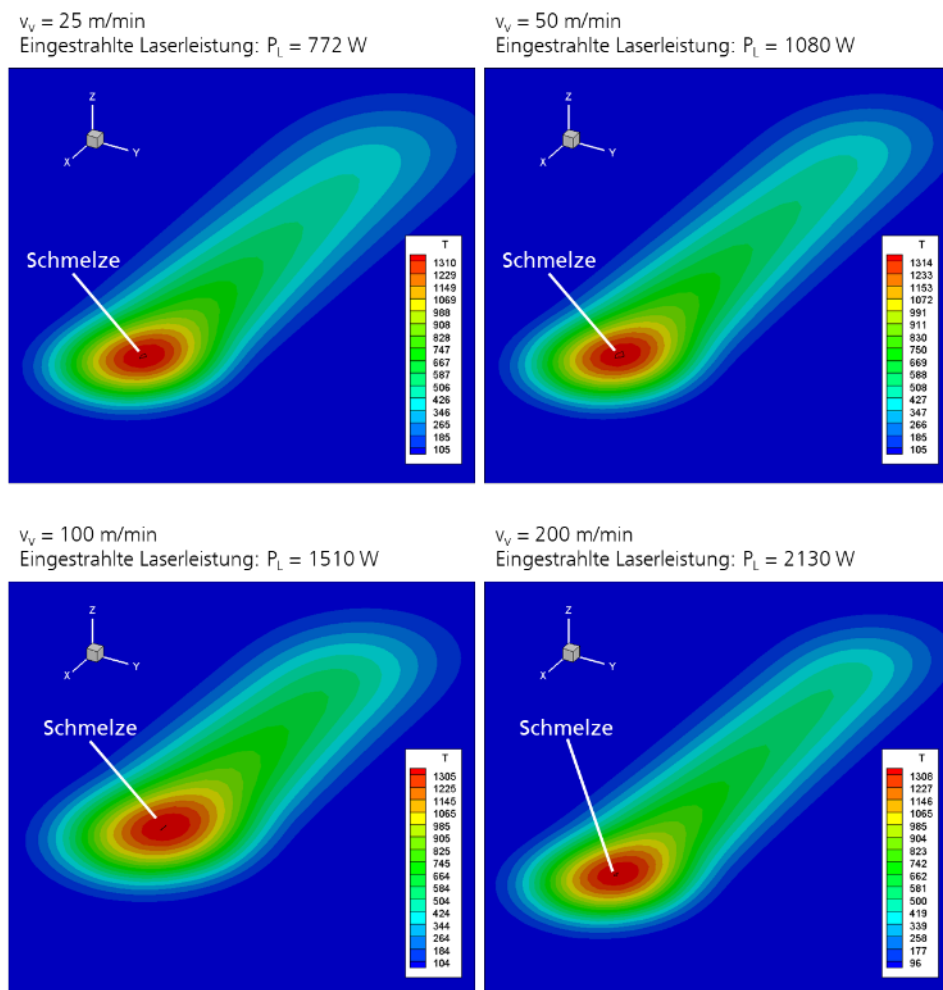
7 Abschätzung Prozessgrenzen und Verifikation

7.1 Abschätzung der Prozessgrenzen

Für die Prozessführung beim EHLA-Verfahren ist es erforderlich, an der Substratoberfläche ein Schmelzbad zu erzeugen. Exemplarisch wurde ausgehend vom Referenzparametersatz modelltheoretisch überprüft, welche Laserleistung P_L eingestrahlt werden muss, um die Substratoberfläche zumindest in einem kleinen Bereich aufzuschmelzen. In Bild 78 sind die Temperaturverteilung des Substrates und die minimal einzustrahlende Laserleistung für Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min sowie die Position und Größe des Schmelzbades dargestellt.

Bild 78
Substrattemperaturverteilung und erforderliche Laserleistung P_L bei Erreichen der Schmelztemperatur an der Substratoberfläche für Vorschubgeschwindigkeiten v_v von 25 bis 200 m/min.

Parameter:
KF2
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $V_{FG} = 5 \text{ l/min}$
 $V_{SG} = 10 \text{ l/min}$



Die erforderliche Laserleistung beträgt zwischen 772 W bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min und 2130 W bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min. Aufgrund der geringen Schmelzbadgröße wird der überwiegende Teil der Partikel nicht in ein Schmelzbad gefördert, sodass die aufgeschmolzenen Partikel überwiegend auf eine vorgewärmte, nicht aufgeschmolzene Substratoberfläche treffen. Wenn der Wärmeeintrag der schmelzflüssigen Partikel ausreichend ist, können die Partikel bei Kontakt eine schmelzmetallurgische Verbindung an der Substratoberfläche ausbilden (vgl. Bild 76). Diese Pulverpartikel können hierbei genau dann zur Spurbildung beitragen, wenn durch den Temperaturzuwachs dT (vgl. Bild 76) eines schmelzflüssigen Partikels lokal die Schmelztemperatur des Substrates überschritten wird. Feste Partikel, die seitlich oder vor der Schmelze auf die Substratoberfläche treffen, prallen im Falle von Partikeltemperaturen kleiner als Schmelztemperatur von der Oberfläche ab und tragen nicht zur Spurbildung bei.

Umso größer die eingestrahlte Laserleistung, desto größer ist die Partikeltemperatur und insbesondere der Anteil der Partikel mit Temperaturen oberhalb der Verdampfungstemperatur. Wie durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (vgl. Kap. 6.2) gezeigt wird, werden dabei die Partikel unter Rauchbildung beschleunigt und von ihrer ursprünglichen geradlinigen Trajektorie abgelenkt. Umso mehr Partikel nicht mehr gezielt in die Prozesszone, d. h. das Schmelzbad, oder den vorgewärmten Bereich auf der Substratoberfläche gefördert werden, desto geringer ist der Anteil der Partikel, die zum Schichtaufbau beitragen können.

Zur Vermeidung einer Verschmutzung der optischen Komponenten durch Rauchbildung und zur Erzielung eines möglichst großen Pulver-Auftragswirkungswertes sollte nur ein möglichst kleiner Anteil der Partikel Verdampfungstemperatur erreichen. Für den exemplarisch betrachteten Parametersatz beträgt der Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur gemäß Bild 62 bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min etwa 8 %. Experimentellen Beobachtungen zufolge können in diesem Laserleistungsbereich ein ausgeprägtes Prozessleuchten und starke Rauchbildung beobachtet werden. Wird die Grenze bzgl. des Anteils der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur auf diesen Wert festgelegt, kann die eingestrahlte Laserleistung nicht weiter vergrößert und demnach bei weiterer Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit keine Schmelze mehr auf der Substratoberfläche erzeugt werden. Die Grenze bzgl. der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit beim EHLA-Verfahren ist demnach durch das Verdampfen eines zu großen Anteils der Partikel bei einer zum Aufschmelzen des Substrates hinreichenden Laserleistung vorgegeben. Wird ein geringer Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur festgelegt, ist die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit entsprechend kleiner, bspw. für einen Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur $< 1 \%$, etwa bei 100 m/min.

7.2 Ermittlung eines Prozessfensters

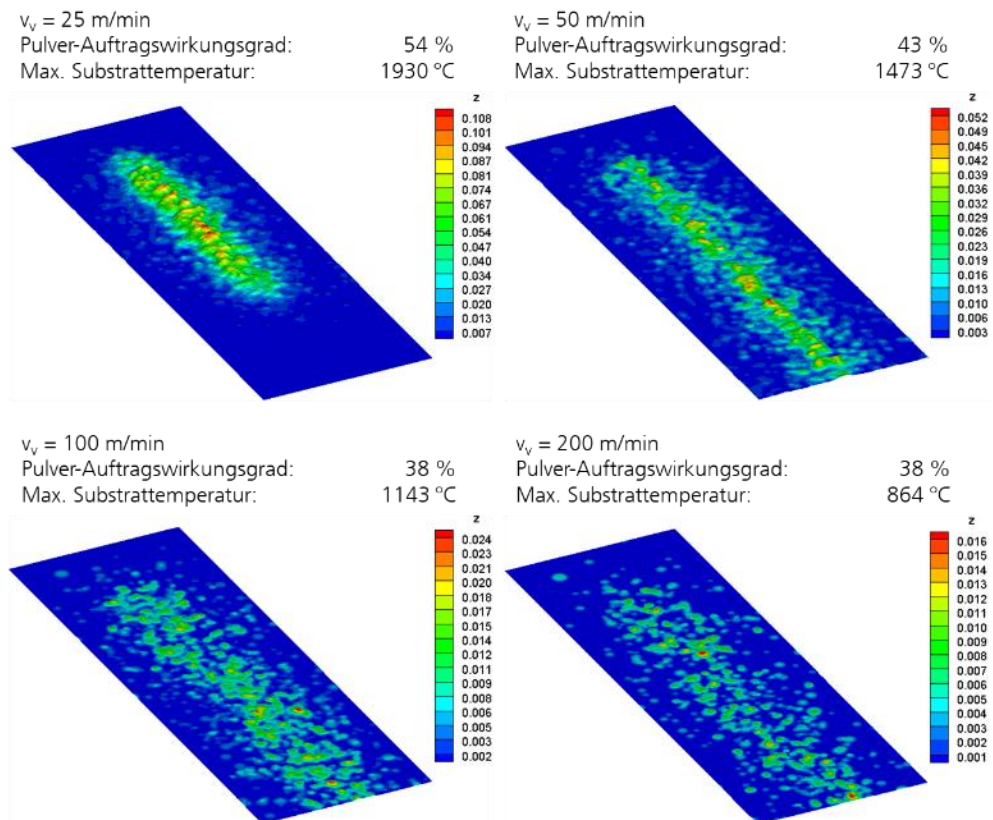
Anhand des entwickelten Modells und der Ergebnisse zum Wärmeaustausch der Partikel mit der Substratoberfläche wurde durch Anpassung der Laserleistung experimentell und modelltheoretisch ein Prozessfenster abgeleitet, bei dem die zur Verfügung gestellte Prozesswärme ausreicht, um bei Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min einen schmelzmetallurgischen Verbund zwischen dem 2.4856-Zusatzwerkstoff und den 1.4301-Stahlwellen zu erzeugen. In Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit wird dabei, bei gleichen Parametern für die Pulverförderung, eine Schmelze auf der Substratoberfläche erzeugt (Verfahrensführung gemäß EHLA) oder das Substrat nur vorgewärmt (Verfahrensführung gemäß MELT-X).

Insgesamt wurden drei Versuchsreihen durchgeführt, um den Bereich für die erforderliche Laserleistung durch sowohl numerische Simulation als auch experimentelle Untersuchungen einzugrenzen. Ausgehend von dem Referenzparametersatz wurde zunächst die Vorschubgeschwindigkeit zwischen 25 m/min und 200 m/min für zwei Laserleistungen variiert: 1200 W und 1400 W. Schließlich wurde die Laserleistung ausgehend von dem Referenzparametersatz bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min zwischen 1200 W und 1800 W variiert. Für die Verfahrensparametersätze wurde jeweils die Schichtbildung von Einzelspuren numerisch simuliert und mit stereolichtmikroskopischen Aufnahmen und metallographischen Querschliffen verglichen. Für die metallographischen Schliffbilder wurden Segmente des Substrates durch Trennschleifen entnommen, in Epoxidharz warmeingebettet und durch Schleifen und Polieren präpariert. Die Querschliffe der Proben wurden lichtmikroskopisch mit einem Mikroskop der Fa. Zeiss (Typ: Axiophot) analysiert.

In Bild 79 sind die Ergebnisse der Berechnungen der Spurgeometrie der Einzelspuren bei einer Laserleistung von 1200 W bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit gegenüber dem Referenzparametersatz zwischen 25 m/min und 200 m/min dargestellt. Der Transmissionsgrad beträgt konstant $T = 0,529$ (vgl. Kap. 6.1). Um der zusätzlichen Erwärmung der Partikel infolge der Reduktion der Partikelgeschwindigkeit in der Nähe der Bearbeitungsebene durch den Prallstrahl sowie der von der Substratoberfläche reflektierten Laserstrahlung Rechnung zu tragen, wurde für den Absorptionsgrad des Pulvers $A = 0,5$ angenommen. Der Anteil der Partikel oberhalb Solidustemperatur beträgt 44 %, wovon durch 1,9 % die Verdampfungstemperatur überschritten wird. Die maximale Substrattemperatur beträgt zwischen 1930 °C ($v_v = 25$ m/min) und 864 °C ($v_v = 200$ m/min). Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min und 50 m/min wird eine Schmelze erzeugt, was der Prozessführung des EHLA-Verfahrens entspricht. Bei Vorschubgeschwindigkeiten von 100 m/min und 200 m/min wird die Schmelztemperatur des Substrates infolge der Erwärmung durch transmittierte Laserstrahlung nicht überschritten, wodurch die Prozessführung dem MELT-X-Verfahren entspricht. Der Pulver-Auftragswirkungsgrad

nimmt bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit infolge der Verringerung der Substrattemperatur bei Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit von 54 % (25 m/min) auf ca. 38 % (100 m/min) ab. Durch eine Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min auf 200 m/min wird der berechnete Pulver-Auftragswirkungsgrad nicht verringert. Die maximale Spurbhöhe beträgt zwischen 115 μm (25 m/min) und 17 μm (200 m/min).

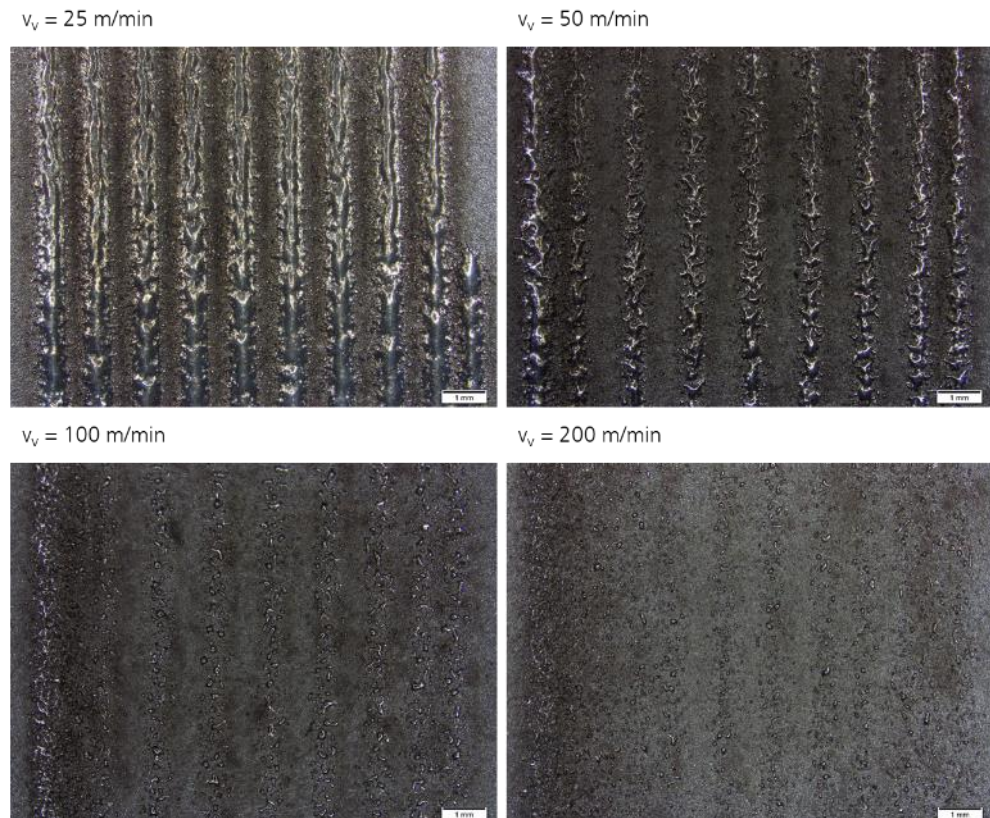
Bild 79
Berechnete Spur-
geometrie für Ein-
zelspuren mit einer
Laserleistung von
 $P_L = 1200 \text{ W}$ bei
Vorschubge-
schwindigkeiten v_v
von 25 bis
200 m/min.



In Bild 80 sind – ausgehend von dem Referenzparametersatz bei einer Laserleistung von 1200 W bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit zwischen 25 m/min und 200 m/min – stereolichtmikroskopische Aufnahmen von Einzelspuren abgebildet. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min konnte eine durchgängige Einzelspur aufgetragen werden. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 m/min ist der Materialauftrag nicht zusammenhängend. Bei weiterer Vergrößerung der Vorschubgeschwindigkeit adsorbieren nur vereinzelte Partikel an der Substratoberfläche, wobei zwischen Vorschubgeschwindigkeiten von 100 m/min und 200 m/min nur geringfügige Unterschiede bzgl. der Menge anhaftender Partikel festgestellt werden können. In Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnte beobachtet werden, dass einzelne Partikel, die an der Substratoberfläche adsorbieren, Keimzellen für die Adsorption weiterer Partikel sind. Infolge des Tempe-

raturzuwaches durch den Wärmeeintrag der anhaftenden Partikel wird ermöglicht, dass auch kleinere schmelzflüssige Partikel mit geringerer Temperatur ebenfalls zur Spurbildung beitragen.

Bild 80
Stereolichtmikroskopische Aufnahmen von Einzelspuren bei einer Laserleistung von $P_L = 1200$ W bei Vorschubgeschwindigkeiten v_v von 25 bis 200 m/min.



In Bild 81 sind die metallographischen Querschliffe von Einzelspuren bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min (links) und bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 m/min (rechts) jeweils bei einer Laserleistung von 1200 W dargestellt. Die Breite der Einzelspur bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min beträgt etwa $600\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Spurhöhe von ca. $95\text{ }\mu\text{m}$, was etwa den erwarteten Spurhöhen aus der Simulation ($115\text{ }\mu\text{m}$) entspricht. Die Einzelspur ist über eine Aufschmelzzone im Mikrometerbereich schmelzmetallurgisch mit dem Grundwerkstoff verbunden. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 m/min ist in Übereinstimmung mit der simulierten Spurgeometrie sowohl lateral als auch in Längsrichtung der Materialauftrag nur partiell erkennbar. Die im Schliffbild gemessene Schichtdicke beträgt etwa $40\text{ }\mu\text{m}$ und die Breite des Einzelspurfragmentes etwa $350\text{ }\mu\text{m}$.

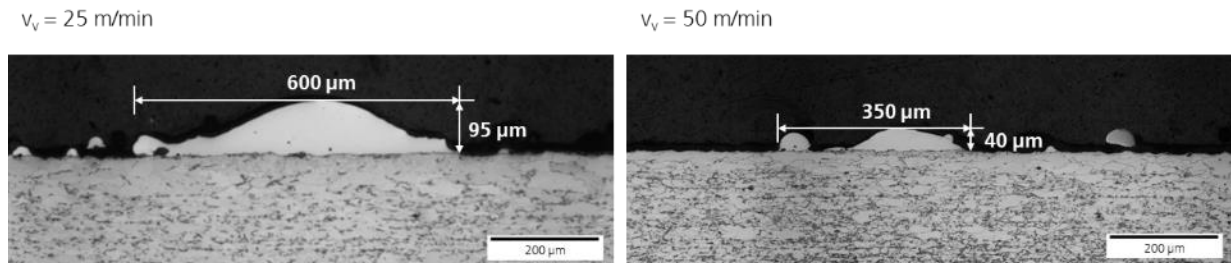
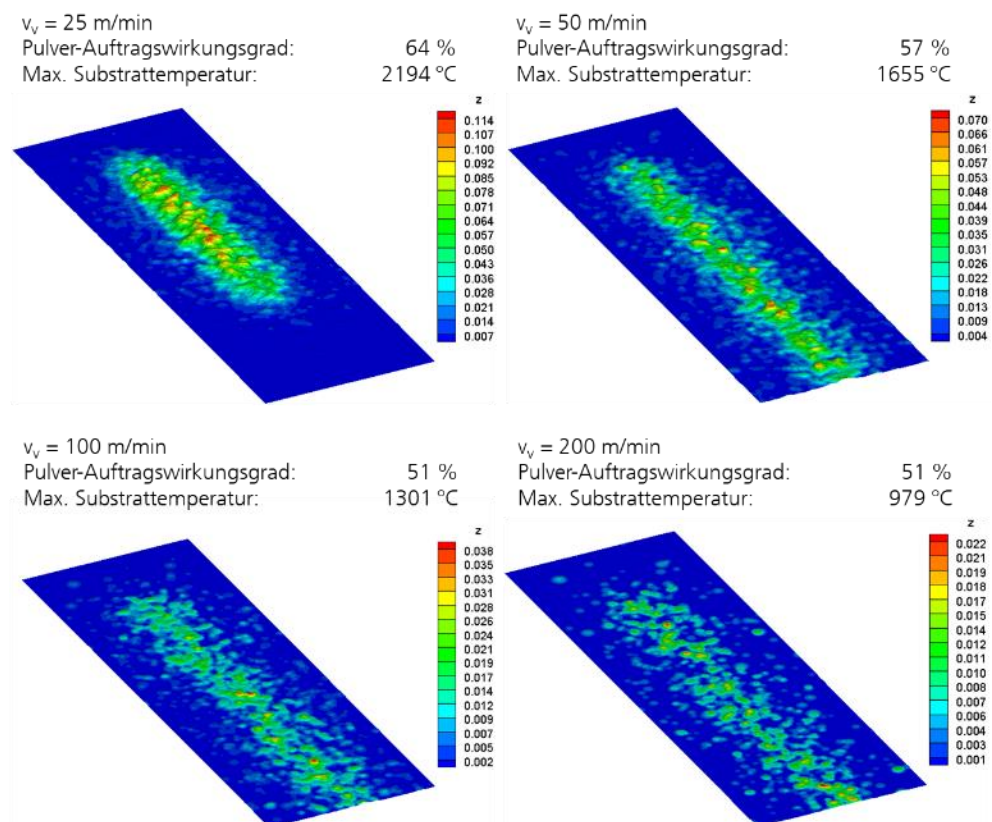


Bild 81 Metallographische Querschliffe von Einzelspuren bei einer Laserleistung von $P_L = 1200$ W bei Vorschubgeschwindigkeiten v_v von 25 m/min und 50 m/min

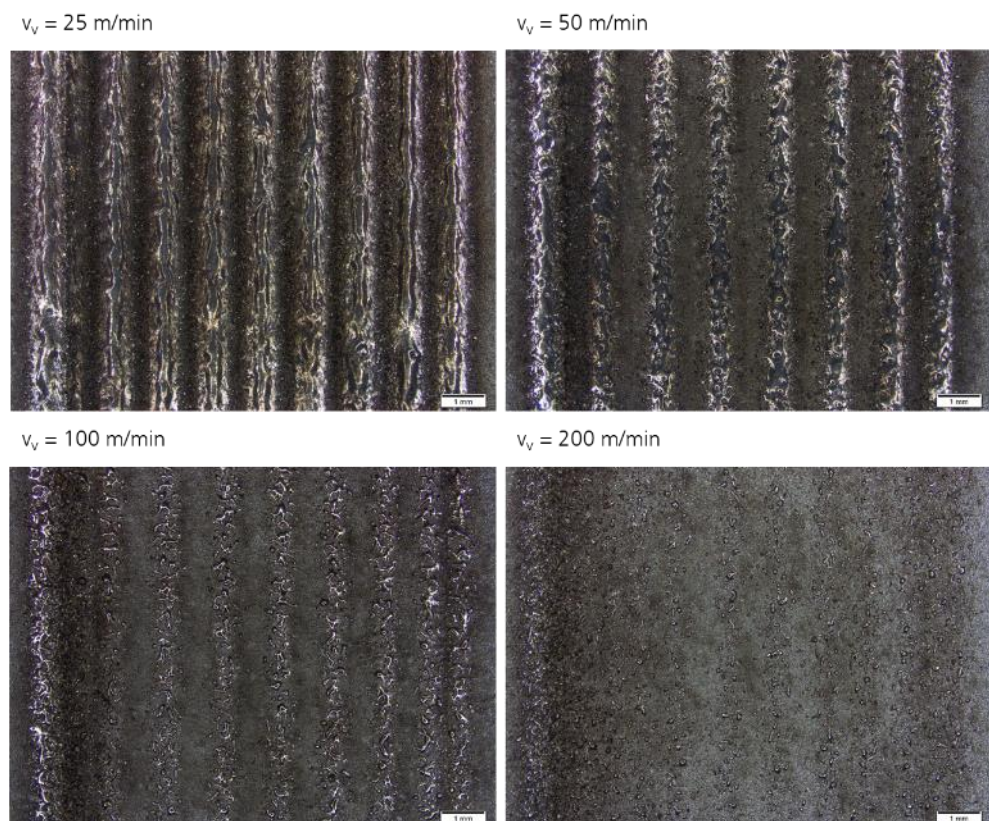
In Bild 82 sind die Ergebnisse der Berechnungen der Spurgeometrie der Einzelspuren bei einer Anpassung des Referenzparametersatzes für eine Laserleistung von 1400 W und Variation der Vorschubgeschwindigkeit zwischen 25 m/min und 200 m/min abgebildet. Insgesamt wird von 48,8 % der Partikel mindestens Solidustemperatur und von 5,4 % die Verdampfungstemperatur erreicht. Die maximale Substrattemperatur beträgt zwischen 2194 °C (25 m/min) und 979 °C (200 m/min). Die maximalen Substrattemperaturen sind gegenüber einer Laserleistung von 1200 W größer.

Bild 82
Berechnete Spur-
geometrie für Ein-
zelspuren mit einer
Laserleistung von
 $P_L = 1400$ W bei
Vorschubge-
schwindigkeiten v_v
von 25 bis
200 m/min.



Bei Vorschubgeschwindigkeiten ≥ 100 m/min wird keine Schmelze auf der Substratoberfläche erzeugt (Verfahrensführung gemäß MELT-X). Der Pulver-Auftragswirkungsgrad beträgt zwischen 64 % (25 m/min) und 51 % (100 m/min). Analog zu den vorherigen Ergebnissen kann kein Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Pulver-Auftragswirkungsgrad beobachtet werden. Die maximale Spurbhöhe wird vergrößert und beträgt zwischen 121 μm (25 m/min) und 23 μm (200 m/min). In Bild 83 sind stereolichtmikroskopische Aufnahmen von Einzelspuren bei einer Laserleistung von 1400 W bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_v zwischen 25 m/min und 200 m/min dargestellt.

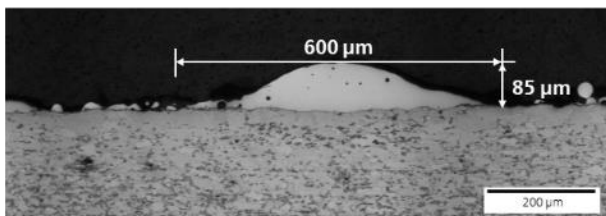
Bild 83
Stereolichtmikroskopische Aufnahmen von Einzelspuren bei einer Laserleistung von $P_L = 1400$ W bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_v von 25 bis 200 m/min



Sowohl bei Vorschubgeschwindigkeiten von 25 m/min als auch bei 50 m/min kann eine durchgängige Einzelspur aufgetragen werden. Gegenüber einer Laserleistung von 1200 W adsorbiert für sämtliche Vorschubgeschwindigkeiten ein größerer Anteil der Partikel an der Substratoberfläche. Anders als durch die Berechnungen der Spurbildung erwartet, kann bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min gegenüber einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min ein größerer Materialauftrag beobachtet werden. In Bild 84 sind die metallographischen Querschliffe von Einzelspuren bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min (links) und bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 m/min (rechts)

abgebildet. Die Einzelspuren sind jeweils schmelzmetallurgisch mit dem Grundwerkstoff verbunden. Die Breite der Einzelspur bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min beträgt etwa 600 μm , wobei gegenüber den Einzelspuren bei einer Laserleistung von 1200 W eine größere Aufmischungszone im Substrat beobachtet werden kann. Die gemessene Spurhöhe beträgt etwa 85 μm . Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 m/min beträgt die im Schliffbild gemessene Schichtdicke etwa 40 μm und die Breite der nicht zusammenhängenden Spur etwa 350 μm , was den erwarteten Spurhöhen aus der Simulation entspricht.

$v_v = 25 \text{ m/min}$



$v_v = 50 \text{ m/min}$

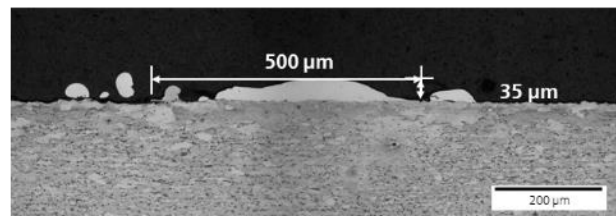
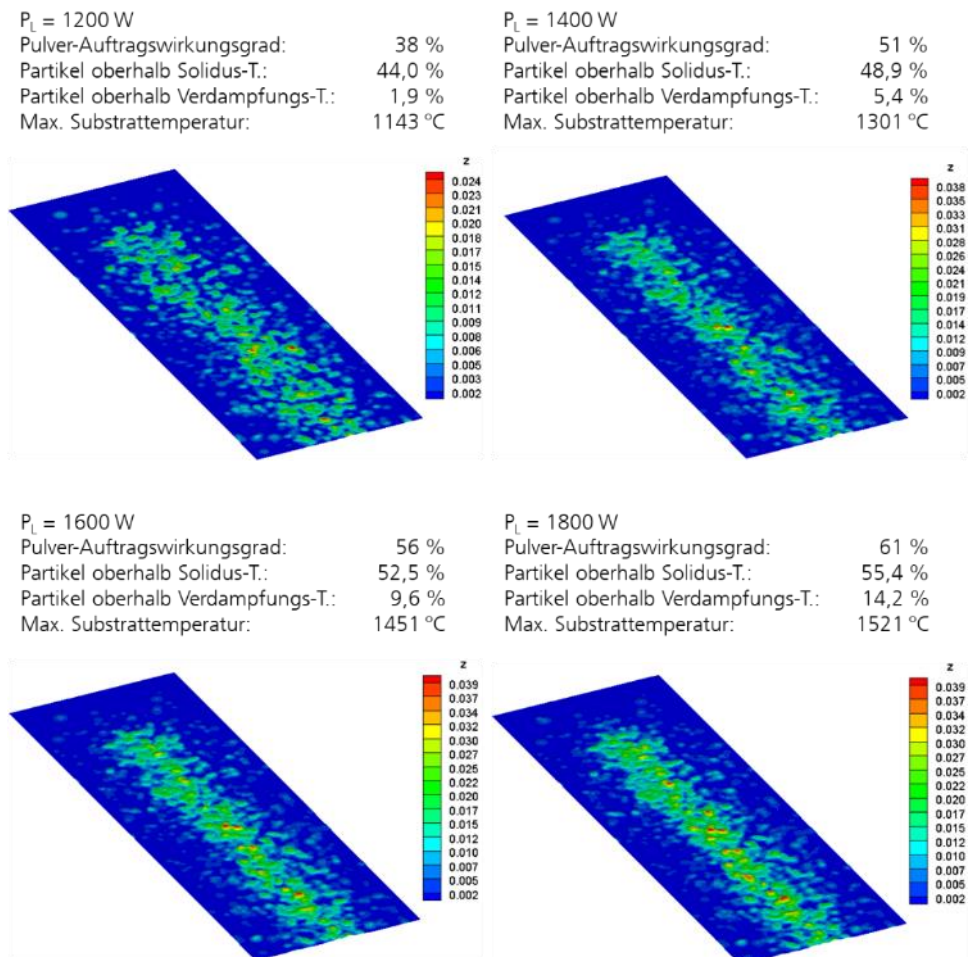


Bild 84 Metallographische Querschliffe von Einzelspuren mit Referenzparametersatz bei einer Laserleistung von $P_L = 1400 \text{ W}$ bei Vorschubgeschwindigkeiten v_v von 25 bis 50 m/min

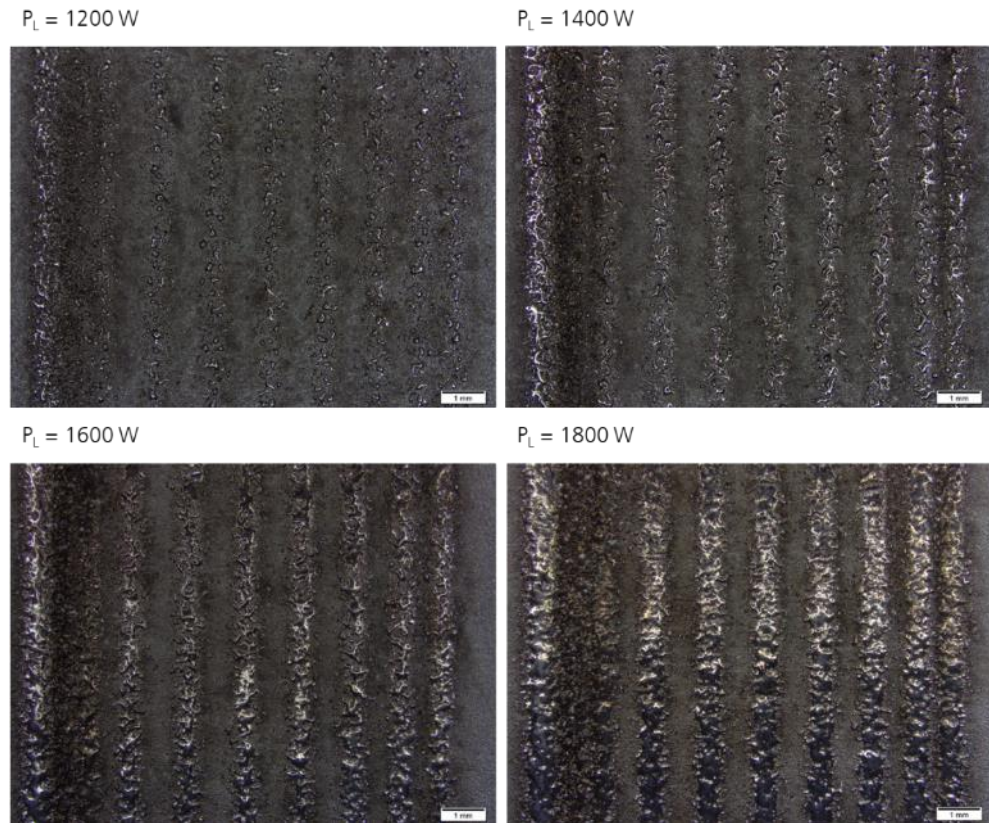
In Bild 85 sind die Ergebnisse der Berechnungen der Spurgeometrie der Einzelspuren ausgehend von dem Referenzparametersatz bei Anpassung der Laserleistung von 1200 W bis 1800 W und einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min dargestellt. Der Anteil der Partikel oberhalb der Solidustemperatur (Verdampfungstemperatur) beträgt zwischen 44,0 % (1,9 %) bei einer Laserleistung von 1200 W und 55,4 % (14,2 %) bei einer Laserleistung von 1800 W. Die maximale Substrattemperatur beträgt zwischen 1143 °C (1200 W) und 1521 °C (1800 W). Bei Laserleistungen $\geq 1600 \text{ W}$ wird an der Substratoberfläche eine Schmelze erzeugt (Verfahrensführung gemäß EHLA). Der berechnete Pulver-Auftragswirkungsgrad nimmt bei Vergrößerung der Laserleistung von 1200 W auf 1400 W stetig zu und beträgt zwischen 38 % (1200 W) und 61 % (1800 W). Die maximale Spurhöhe nimmt bei Vergrößerung der Laserleistung von 1200 W von etwa 25 μm auf etwa 41 μm deutlich zu. Bei weiterer Vergrößerung der Laserleistung kann kein Einfluss der Laserleistung auf die maximale Spurhöhe berechnet werden, jedoch wird infolge des gesteigerten Pulver-Auftragswirkungsgrads die Spur zunehmend dicht.

Bild 85
Berechnete Spur-
geometrie für Ein-
zelspuren mit La-
serleistungen P_L
zwischen 1200 W
und 1800 W bei
einer Vorschubge-
schwindigkeit von
 $v_v = 100$ m/min



In Bild 86 sind stereolichtmikroskopische Aufnahmen von Einzelspuren bei Anpassung der Laserleistung von 1200 W (oben links) bis 1800 W (unten rechts) gegenüber dem Referenzparametersatz bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min abgebildet. Bei Laserleistungen von 1200 W und 1400 W adsorbiert in Einzelspuren nur ein geringer Anteil der Pulverpartikel an das Substrat. Bei einer Laserleistung von 1600 W können vereinzelt zusammenhängende Bereiche aufgetragen werden. Bei einer Laserleistung von 1800 W ist die Einzelspur geschlossen.

Bild 86
Stereolichtmikroskopische Aufnahmen von Einzelspuren bei einer Laserleistung P_L von 1200 W (oben links) bis 1800 W (unten rechts)



In Bild 87 sind die metallographischen Querschliffe von Einzelspuren bei Anpassung des Referenzparametersatzes für Laserleistungen von 1600 W (links) und 1800 W (rechts) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min dargestellt. Die Einzelspuren sind jeweils schmelzmetallurgisch mit dem Grundwerkstoff verbunden. Die Breite des Spurfragmentes bei einer Laserleistung von 1600 W beträgt etwa 500 μm , die Spurbreite bei einer Laserleistung von 1800 W etwa 600 μm . Die gemessene Spurbhöhe beträgt, wie in den Simulationen ungefähr erwartet, jeweils etwa 30 μm .

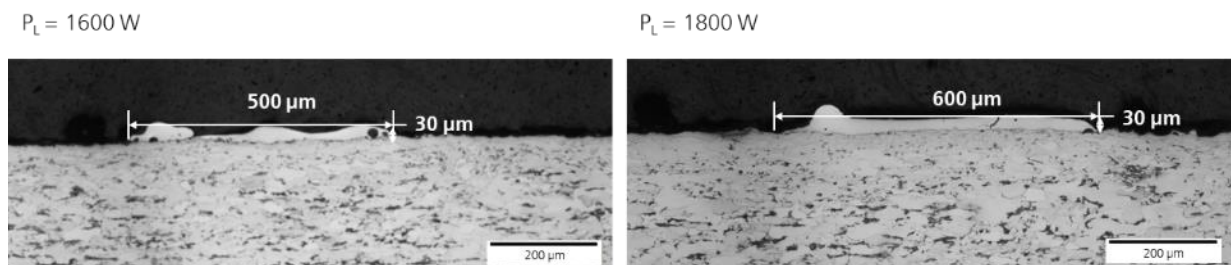
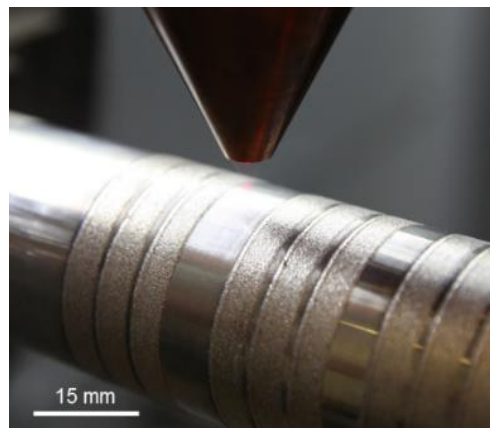


Bild 87 Metallographische Querschliffe von Einzelspuren bei einer Laserleistung von 1600 W und 1800 W und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_v = 100 \text{ m/min}$

7.3 Verifikation eines Prozessfensters

Insgesamt wurden 27 Versuche durchgeführt, mit denen für Überlappspuren experimentell der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und des Pulvermassenstroms auf die Schichtqualität hinsichtlich Poren, Bindefehlern oder Rissen untersucht wird. Dazu wurden je 5 mm breite 2.4856-Schichten auf 1.4301-Stahlwellen aufgetragen (siehe Bild 88) und anschließend metallographisch untersucht. Segmente der beschichteten Welle wurden durch Trennschleifen entnommen und durch Schleifen und Polieren präpariert. Die Querschliffe der Proben wurden lichtmikroskopisch mit einem Mikroskop der Fa. Zeiss (Typ: Axiophot) analysiert.

Bild 88
Exemplarische Darstellung der 5 mm breiten Überlappspuren für die experimentellen Untersuchungen

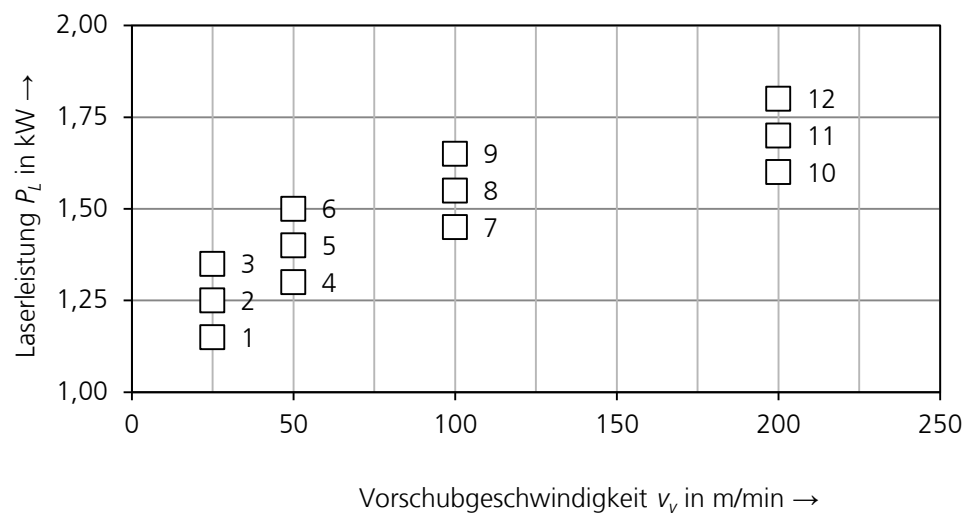


Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Vorschubgeschwindigkeit wurden 12 Versuche durchgeführt. Dazu wurde ausgehend vom Referenzparametersatz die Laserleistung P_L bei einem konstanten Pulvermassenstrom von 15 g/min in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_v angepasst. Der Bereich für die Laserleistung kann auf Basis der Voruntersuchungen in Kap. 7.2 in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit abgeleitet werden. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25 m/min können defektfreie Einzelspuren bei einer Laserleistung von 1200 W erzeugt werden. Daher wird die Laserleistung zwischen 1150 W und 1350 W variiert. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 m/min werden bei einer Laserleistung von 1400 W für Einzelspuren bereits einzelne zusammenhängende Bereiche aufgetragen. Die Laserleistung wurde demnach zwischen 1300 W und 1500 W variiert. Für eine Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min werden bei einer Laserleistung von 1600 W schmelzmetallurgisch angebundene Bereiche aufgetragen. Die Laserleistung wurde dementsprechend zwischen 1450 W und 1650 W variiert. Gemäß Bild 70 wird dabei für eine Laserleistung von 1450 W keine Schmelze auf der Substratoberfläche erzeugt (Prozessführung entspricht MELT-X). Gemäß Bild 82 ist bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min eine Laserleistung von 1400 W nicht ausreichend, um eine geschlossene Spur aufzutragen. Die Laserleistung wurde demnach zwischen 1600 W und 1800 W variiert. Dabei wird bei diesen Laserleistungen die Schmelztemperatur

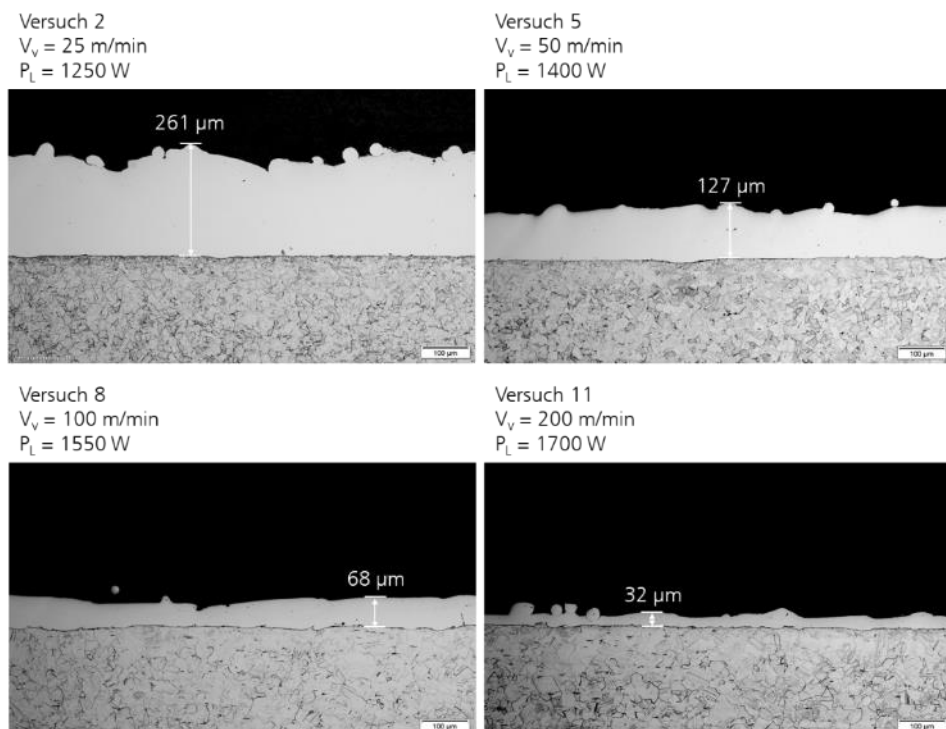
des Substrates nicht überschritten (MELT-X). Der Versuchsplan für die Versuche 1 bis 12 ist zusammenfassend in Bild 89 aufgetragen.

Bild 89
Anpassung der Laserleistung P_L in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_v bei einem Pulvermassenstrom von 15 g/min



In Bild 90 sind exemplarisch die metallographischen Schliffbilder der Versuche 2, 5, 8 und 11 dargestellt, die repräsentativ für den gewählten Laserleistungsbereich bei den entsprechenden Vorschubgeschwindigkeiten sind.

Bild 90
Metallographische Schliffbilder der Versuche 2, 5, 8 und 11.

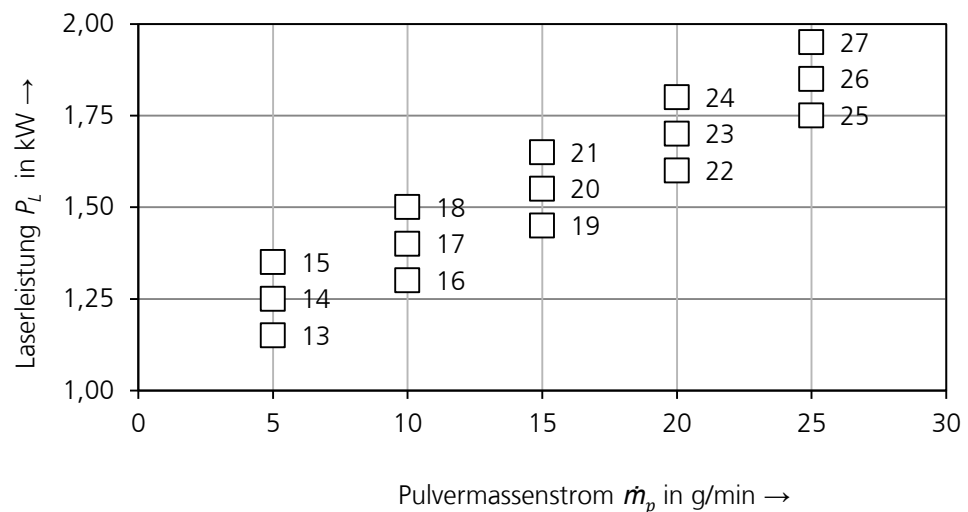


Die Variation der Laserleistung im untersuchten Bereich weist demnach einen nicht signifikanten Einfluss auf den Aufmischungsgrad oder die Schichtdicke der erzeugten Schichten auf, sodass mit allen Einstellungen poren- und rissfreie Schichten hergestellt werden konnten. Die Schichtdicke korreliert mit der Vorschubgeschwindigkeit und beträgt zwischen ca. 250 μm (25 m/min) und ca. 30 μm (200 m/min). Gegenüber den Spurhöhen der Einzelspuren sind die Schichtdicken der Überlappspuren etwa um einen Faktor 2 bis 3 größer. Für alle Versuche ist die Tiefe der Aufmischungszone $< 5 \mu\text{m}$.

Einfluss des Pulvermassenstroms

Zur Untersuchung des Einflusses des Pulvermassenstroms wurden insgesamt 15 Versuche durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug konstant 100 m/min. Die Laserleistung P_L wurde ausgehend vom Referenzparametersatz für Pulvermassenströme $\dot{m}_p$ zwischen 5 g/min und 25 g/min angepasst. Da sich bei einer Verringerung des Pulvermassenstroms der Transmissionsgrad (vgl. Bild 50) sowie die Substrattemperatur (vgl. Bild 65) nahezu linear vergrößern, wurde die Laserleistung ebenfalls linear an den Pulvermassenstrom angepasst. Anhand von Vorversuchen wurde eine Anpassung um 150 W pro 5 g/min gewählt. Der Versuchsplan für die Versuche 13 bis 27 ist zusammenfassend in Bild 89 aufgetragen.

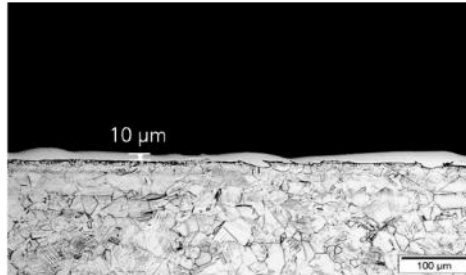
Bild 91
Anpassung der Laserleistung P_L in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms $\dot{m}_p$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min



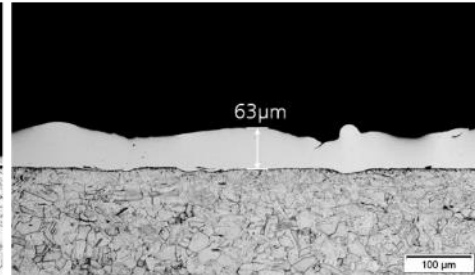
In Bild 92 sind exemplarisch für den jeweiligen Pulvermassenstrom repräsentative metallographische Schliffbilder für die Versuche 14, 17 und 26 dargestellt. Mit sämtlichen Verfahrensparametern konnten metallurgisch angebundene, poren- und rissfreie Beschichtungen erzeugt werden. Die Schichtdicke ist linear von dem Pulvermassenstrom abhängig und beträgt zwischen ca. 10 μm (5 g/min) und ca. 100 μm (25 g/min). Für alle Versuche ist die Tiefe der Aufmischungszone $< 5 \mu\text{m}$. Ein signifikanter Einfluss der Laserleistung im untersuchten Bereich auf die Schichtdicke oder Anbindungszone kann nicht beobachtet werden.

Bild 92
Metallographische
Schliffbilder der
Versuche 14, 17
und 26

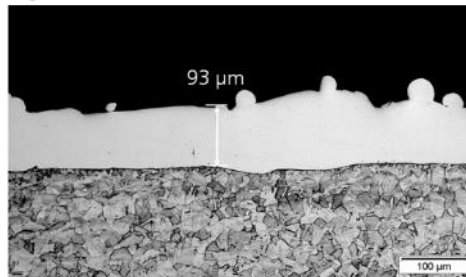
Versuch 14
 $\dot{m}_p = 5 \text{ g/min}$
 $P_L = 1250 \text{ W}$



Versuch 20
 $\dot{m}_p = 15 \text{ g/min}$
 $P_L = 1550 \text{ W}$



Versuch 26
 $\dot{m}_p = 25 \text{ g/min}$
 $P_L = 1850 \text{ W}$



Zusammenfassend können unter Anpassung der Laserleistung mit dem gewählten Prozessfenster 10 bis 250 μm dünne defektfreie, schmelzmetallurgisch angebundene Schichten bei Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min hergestellt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Werkzeuge für das EHLA, der Pulver-Gas-Strahl und die Laserstrahlung, experimentell charakterisiert und mit einem mathematischen Modell beschrieben, dessen Annahmen aus experimentellen Beobachtungen abgeleitet werden. Mit Hilfe eines Messgerätes auf Basis des Laserlichtschnittverfahrens wird ebenenweise die Anzahl und Position der Pulverpartikel der Pulver-Gas-Strömung für unterschiedliche Kornfraktionen, Pulvermassenströme sowie Förder- und Schutzgaseinstellungen quantitativ vermessen. Mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Pulver-Gas-Strahls kann gezeigt werden, dass die Trajektorien der Partikel nach Verlassen der Düsenaustrittsöffnung geradlinig bis zum Kontakt mit dem Substrat verlaufen. Das erlaubt eine explizite Darstellung der Partikeltrajektorien und -geschwindigkeiten auf Basis eines statistischen Modells. Die Laserleistungsdichteverteilung wird mittels eines kamerabasierten Strahldiagnosesystems vermessen und anschließend auf Basis eines Super-Gauß-Ansatzes analytisch beschrieben. Damit kann die Wechselwirkung der Laserstrahlung mit den Pulverpartikeln numerisch detailliert simuliert werden und es können erstmalig die prozessrelevanten Einflussgrößen für das EHLA-Verfahren (Transmissionsgrad, Partikelerwärmung im Strahlengang, Erwärmung des Substrates und Wärmeaustausch der Partikel mit der Substratoberfläche) in Abhängigkeit der Einstellungen für die Pulverförderung (Pulverkornfraktion, Förder- und Schutzgas-Volumenstrom, Pulvermassenstrom), des Arbeitsabstandes, der Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit beschrieben werden.

Beim EHLA-Verfahren wird vorausgesetzt, dass an der Substratoberfläche eine Schmelze erzeugt wird. Der überwiegende Anteil der Partikel wird oberhalb der Substratoberfläche durch die Laserstrahlung vollständig aufgeschmolzen. Durch den Energieeintrag der schmelzflüssigen Partikel wird das Substrat zusätzlich erwärmt. Dadurch können auch Partikel, die außerhalb der Schmelze auf die vorgewärmte Substratoberfläche treffen, einen schmelzmetallurgischen Verbund ausbilden und damit zur Spurbildung beitragen. Für die verwendete Systemtechnik wird gezeigt, dass ein hinreichender Energieeintrag durch die schmelzflüssigen Partikel zur Ausbildung eines metallurgischen Verbundes an der Kontaktstelle von Partikel und Substrat bei nicht vorgewärmtem Substrat nur durch größere Partikel mit einem Partikeldurchmesser größer als etwa 30 μm mit einer Temperatur nahe der Verdampfungstemperatur erreicht werden kann. Für kleinere Partikel muss das Substrat an der Kontaktstelle bereits ausreichend durch die transmittierte Laserstrahlung vorgewärmt sein, damit beim Wärmeaustausch des Partikels mit dem Substrat Schmelztemperatur erreicht wird.

Zum Aufschmelzen der Substratoberfläche ist in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und des Transmissionsgrades eine bestimmte Laserleistung erforderlich, die umso größer ist, je größer die Vorschubgeschwindigkeit. Die Grenze bzgl. der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit beim EHLA-Verfahren ist durch das Verdampfen eines zu großen Anteils der Partikel bei einer zum Aufschmelzen des Substrates hinreichenden Laserleistung vorgegeben und davon abhängig, wie groß dieser Anteil gewählt wird. Wird festgelegt, dass der Anteil der Partikel oberhalb Verdampfungstemperatur $\leq 8\%$ sein soll, können mit dem EHLA-Verfahren und der verwendeten Systemtechnik maximal Vorschubgeschwindigkeiten von 200 m/min erreicht werden. Wird ein geringer Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur festgelegt, ist die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit entsprechend kleiner – bspw. für einen Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur $< 1\%$, etwa bei 100 m/min.

Im Rahmen der Arbeit wird experimentell und modelltheoretisch gezeigt, dass die Erzeugung einer Schmelze durch die transmittierte Laserstrahlung keine notwendige Voraussetzung zur Herstellung metallurgisch angebundener Schichten ist. Das Substrat muss durch den transmittierten Strahlungsanteil nur so weit vorgewärmt werden, dass der Energieeintrag geschmolzener Pulverpartikel ausreichend ist, um selbst bei einem festen, noch nicht geschmolzenen Substrat eine schmelzmetallurgische Verbindung an der Oberfläche auszubilden. Diese Prozessführung wird als Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserschmelzspritzen (MELT-X) bezeichnet. Da beim MELT-X- gegenüber dem EHLA-Verfahren geringere Laserleistungen benötigt werden, kann die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit bei ansonsten gleichen Voraussetzungen (Transmissionsgrad, Partikelerwärmung etc.) weiter vergrößert und die bisherige Prozessgrenze beim EHLA-Verfahren überwunden werden. Abschließend wird experimentell ein Prozessfenster für Überlappspuren verifiziert, mit dem 10 bis 250 μm dünne defektfreie, schmelzmetallurgisch angebundene Schichten bei Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 25 m/min und 200 m/min und Flächenraten von bis zu 500 cm^2/min hergestellt werden können.

Ausblick

Um die Einsatzmöglichkeiten des EHLA- bzw. MELT-X-Verfahrens für die Produktion in den Bereichen Oberflächentechnik, Reparatur und additive Fertigung weiter zu vergrößern, können die folgenden wesentlichen sowohl experimentellen als auch modelltheoretischen Teilziele formuliert werden:

- Weiterentwicklung der Messtechnik zur Charakterisierung des Pulver-Gas-Strahls zur Nutzung auch bei Pulvermassenströmen $> 100\text{ g/min}$, u. a. durch:
 - Vergrößerung der Auflösung des Kamerachips zur Reduktion von Partikel-Partikel-Abschattung und perspektivisch zur simultanen Auswertung der Korngrößenverteilung innerhalb einer Messebene
 - Verringerung der Höhe der Beleuchtungs-Laserstrahlung zur Vergrößerung der Genauigkeit bei der Partikelzählung

- Verringerung der Belichtungszeit zur Reduktion der Bewegungsunschärfe
- Weiterentwicklung des Prozessmodells für das EHLA-Verfahren, u. a. durch:
 - Erweiterung des Modells zur Berücksichtigung von Effekten bei Partikeltemperaturen größer als Verdampfungstemperatur auf Partikeltrajektorie (Ablenkung, Beschleunigung), und -erwärmung sowie den Transmissionsgrad und die Substraterwärmung
 - Berücksichtigung/Quantifizierung der Partikelerwärmung infolge der Reduktion der Partikelgeschwindigkeit durch den Prallstrahl
 - Berücksichtigung/Quantifizierung der Partikelerwärmung infolge des von der Substratoberfläche reflektierten Strahlungsanteils
 - Erweiterung um ein Modell zum Kontakt, zur Verformung und Erstarrung der Partikel beim Kontakt mit dem Substrat bei variierender Substrattemperatur
- Erhöhung der Flächen- und Aufbauraten durch die Entwicklung von Prozessführungsstrategien bei Laserleistungen im Multi-Kilowatt-Bereich, insbesondere durch Anpassung der Pulverzufuhrdüsen sowie der Strahlführung und -formung für das EHLA-Verfahren. Dazu Untersuchung der Machbarkeit der beiden Ansatzpunkte zur Vergrößerung der Flächenrate:
 - Vergrößerung des Spurversatzes durch Vergrößerung der Strahlfläche bzw. der Spurbreite, ohne den Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur zu vergrößern, bspw. durch Vergrößerung der Partikelgeschwindigkeit
 - Vergrößerung der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit, ohne den Anteil der Partikel oberhalb der Verdampfungstemperatur zu vergrößern, bspw. durch Verringerung der Strahlfläche und Entwicklung von Pulverzufuhrdüsen, mit denen kleinere Pulverfokusdurchmesser erzielt werden können
- Entwicklung von Maschinentechnik für nichtrotationssymmetrische Bauteile, z. B. auf Basis hochdynamischer Linearmaschinen oder neuartiger Konzepte wie Tri- oder Hexapoden
- Entwicklung von Maschinentechnik für Kombinationsverfahren, z. B. EHLA mit simultanem Drehen, Schleifen oder Rollieren in einer Maschinentechnik
- Weiterentwicklung der Prozessführung zur Verfügbarmachung neuartiger Eigenschaften infolge der extremen Abkühlraten zur Entwicklung innovativer Werkstoffe und Werkstoffverbünde, z. B. Beschichtung von Gusseisen und Aluminium, Multimaterialverarbeitung, metallische Gläser, z. B. mit Hilfe experimenteller und modelltheoretischer Analysen von Eigenspannungen oder Verzug in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bzw. Aufbaurate
- Prozessführungsstrategien zum Auftragen schwer oder nicht schweißbarer Werkstoffkombinationen, z. B. Al-Ti, Fe-Al, oder Fe-Cu durch rechnergestützte Prozessauslegung des Energieeintrages in Pulverpartikel und Substrat

9 Anhang

9.1 Quellenangaben und weiterführende Literatur

- [1] World Bank (2018): World Development Indicators, zitiert nach de.statista.com, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37088/umfrage/anteile-der-wirtschafts-sektoren-am-bip-ausgewaehlter-laender/>, zuletzt geprüft am: 01.08.2018
- [2] Statistisches Bundesamt (2018): Erwerbstätige und Arbeitnehmer nach Wirtschaftsbereichen, URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/TabellenErwerbstaetigenrechnung/ArbeitnehmerWirtschaftsbereiche.html>, zuletzt geprüft am: 01.08.2018
- [3] Statistisches Bundesamt (2018): Anzahl der Erwerbstätigen in Deutschland nach Wirtschaftsbereichen von 2007 bis 2017 (in 1.000), zitiert nach de.statista.com, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/74315/umfrage/anzahl-der-erwerbstae-tigen-mit-arbeitsort-in-deutschland-nach-wirtschaftsbereichen/>, zuletzt geprüft am: 01.08.2018
- [4] Statistisches Bundesamt (2018): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Inlandsproduktsberechnung, Lange Reihen ab 1970, URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/Inlandsprodukt/InlandsproduktsberechnungVorlaeufigPDF_2180140.pdf;jsessionid=5D3766D88A6A4D05B65F83190EED8E48.cae2?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am: 01.08.2018
- [5] Aghassi S. et al. (2011) Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: Brecher C. (eds) Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 18,19
- [6] Statistisches Bundesamt (2018): Kennzahlen der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes 2016, URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Tabellen/KennzahlenVerarbeitendesGewerbe.html>, zuletzt geprüft am: 01.08.2018
- [7] Erhardt, R., Pastewski, N. (2010): Relevanz der Ressourceneffizienz für Unternehmen des produzierenden Gewerbes, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, S. 3
- [8] Bandorf, R., Diehl, W., Heckmann, U., Holeczek, H., Klotzbach, U., Kondruweit-Reinema, S., Leson, A., Metzner, M., Pflug, A., Zimmer, O. (2008): Produktionstechnik zur Erzeugung funktionaler Oberflächen, Braunschweig, S. 13,14
- [9] DFO Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (2007): Forschungsagenda Oberfläche, Neuss, S. 15
- [10] Weißbach, W., Dahms, M., Jaroschek, C. (2015): Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Vieweg+Teubner, 18. Auflage, Wiesbaden, S. 459
- [11] Schulz, D., Kirch, D. J (2018): Brems-scheiben vor der Beschichtung effizient aktivieren. Oberfl Techn, 58: 49. <https://doi.org/10.1007/s35144-018-0041-x>

- [12] Volkswagen Aktiengesellschaft, 2017. Verfahren zum Erzeugen einer verschleiß- und/oder korrosionsfesten Beschichtung auf einer Reibfläche eines Bremskörpers sowie nach dem Verfahren herstellbarer Bremskörper. Erfinder: Markus Harke. Veröffentlichungsdatum: 27.07.2017. Anmeldung: 25.01.2016. DE 102016200951A1
- [13] Jörß, W., Kugler, U., Theloke, J. (2010). Emissionen im PAREST-Referenzszenario 2005-2020. PAREST-Hintergrundbericht, im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens FKZ, 206(43), 200, S. 14
- [14] Andreas Pfeffer (2017). Bremsscheibe »iDisc« von Bosch reduziert Bremsstaub. URL: <https://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/sonstiges/bremsscheibe-idisc-von-bosch-reduziert-bremsstaub-148151.html>, zuletzt geprüft am 01.01.2018
- [15] Dennis, J. K., Such, T. E. (2013). Nickel and Chromium Plating. Butterworth-Heinemann, S. 185
- [16] Mellor, B. G. (Ed.). (2006). Surface Coatings for Protection Against Wear. Woodhead Publishing, S. 84–86, S. 251–259
- [17] Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) (2006). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1907-20140410>, zuletzt geprüft am: 01.08.2018
- [18] Sparkassen-Finanzgruppe (2014): Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung. Deutscher Sparkassen Verlag GmbH, Stuttgart, S. 17
- [19] Rusch, W. (2007). Comparison of operating characteristics for gas and liquid fuel HVOF torches. Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, S. 14–16.
- [20] Maria O., Erja T., Tomi S., Tommi V., Simo-Pekka H. (2011): Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications. Coatings 2011, 1, S. 17-52; doi:10.3390/coatings1010017.
- [21] Bolelli, G., Berger, L. M., Bonetti, M., Lusvarghi, L. (2014): Comparative study of the dry sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC–(W, Cr) 2C–Ni and WC–CoCr hard-metal coatings. Wear, 309(1-2), S. 96–111.
- [22] Fochesatto, N. S., Buezas, F. S., Rosales, M. B., Tuckart, W. R. (2017): Effect of Crack Patterns on the Stress Distribution of Hard Chromium Coatings Under Sliding Contact: Stochastic Modeling Approach. Journal of Tribology, 139(6), 061401.
- [23] Lampke, T. (2017): Innere Hydrophobierung von thermisch gespritzten Schichten. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben-Nr. 18.153 B der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, S. 6–7
- [24] Merkblatt DVS/GTS 2307 (07/2011): Arbeits- und Umweltschutz beim thermischen Spritzen, DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. Gemeinschaft Thermisches Spritzen, DVS Media GmbH, Düsseldorf
- [25] Davis, J. R. (Ed.). (2004): Handbook of thermal spray technology. ASM international, S. 51–52
- [26] Zhang, K. et al. (2012): Influences of Processing Parameters on Dilution Ratio of Laser Cladding Layer during Laser Metal Deposition Shaping, Advanced Materials Research, Vol. 549, S. 785–789

- [27] Gasser, A. et al. (2010): Maßgeschneiderte Oberflächen und Bauteile – Der Einsatz von Laserstrahlung in der Oberflächentechnik und im Rapid Manufacturing – Teil 1. Laser-Technik-Journal Volume 7(4), 2010, S. 47–53
- [28] Beyer, E., Wissenbach, K. (1998): Oberflächenbehandlung mit dem Laserstrahl, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-58726-9, S. 7, 243–251
- [29] Nowotny, S. et al. (2007): Laser Beam Build-Up Welding: Precision in Repair, Surface Cladding, and Direct 3D Metal Deposition. Journal of Thermal Spray Technology Volume 16(3), S. 344–348
- [30] Sexton, C.L. (2015): Hardfacing, traditional vs. laser. URL: <http://laserage.eu/wp-content/uploads/2017/03/Hardfacing-Traditional-vs-Laser-LaserAge-Ltd.pdf>, zuletzt geprüft am: 01.08.2018
- [31] Rütering, M. (2016): Optimizing Components and Surfaces with Diode Laser – Generating, Cladding and Hardening of Products. Herausgegeben von: Laser Systems Europe. URL: https://www.lasersystemeurope.com/sites/default/files/content/white-paper/pdfs/Laserline%2520-%2520Markus%2520Ruetering_2%5B1%5D.pdf, zuletzt geprüft am: 01.01.2018
- [32] Coherent Inc.: Cladding with High Power Diode Lasers. Herausgegeben von Flame Spray Technologies BV. URL: <http://www.fst.nl/downloads/pdf/76/laser-cladding-with-high-power-diode-lasers.pdf&cd=12&hl=de&ct=clnk&gl=de&client=firefox-b>, zuletzt geprüft am: 01.01.2018
- [33] Poprawe, R., Hinke, C., Meiners, W., Eibl, F., Zarei, O., Voshage, M., Willenborg, E. et al. (2018, February): Digital photonic production along the lines of industry 4.0. In Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXIII (Vol. 10519, p. 1051907). International Society for Optics and Photonics.
- [34] Schopphoven, T., Gasser, A., Backes, G. (2017): EHLA: Extreme High-Speed Laser Material Deposition: Economical and effective protection against corrosion and wear. Laser Technik Journal, 14(4), S. 26–29.
- [35] Schopphoven, T., Gasser, A., Wissenbach, K., Poprawe, R. (2016): Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying. Journal of Laser Applications, 28(2), 022501.
- [36] Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung, 2015. Extremes Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißverfahren. Erfinder: Wolfgang Küppers, Gerhard Maria Backes, Jochen Kittel. Veröffentlichung: 07.05.2015. Anmeldung: 04.05.2011. DE, Patentschrift: DE 10 2011 100 456 B4
- [37] Oerlikon Metco: MetcoClad Systeme für das Laserauftragschweißen. URL: https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_FLY-0018.5_LaserCladdingSystems_DE.pdf&download=1, zuletzt geprüft am: 01.01.2018
- [38] Majumdar, J. D., Mann, I (2013): Laser Assisted Fabrication of Materials, Springer Verlag, Heidelberg, S. 226–230
- [39] Fraunhofer-Institut für Lasertechnik: Koaxiale Pulverdüsen. URL: https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Leistungsangebote/lasermaterialbearbeitung/HZ_Koaxiale%20Pulverdu%CC%88sen_de.pdf, zuletzt geprüft am: 01.01.2018
- [40] Toyserkani, E. et al. (2005): Laser Cladding. CRC Press LLC, Florida, S. 68–81

- [41] Bitragunta, V. S., Sparks, T., Liou, F. (2015): Performance Metric for Powder Feeder Systems In Additive Manufacturing, Missouri University of Science and Technology, M.S. Missouri University of Science and Technology
- [42] Vuoristo, P., Tuominen, J., Nurminen, J. (2005): Laser coating and thermal spraying - process basics and coating properties, In: Conference proceedings: ITSC 2005. Basel, Switzerland, International Thermal Spray Conference & Exposition; 2005
- [43] Zhong, M., Liu, W. (2010). Laser surface cladding the state of the art and challenges. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C Journal of Mechanical Engineering Science
- [44] Gu, D. (2015). Laser additive manufacturing of high-performance materials. Springer, Berlin Heidelberg
- [45] Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (2015): Jahresbericht, Dreistrahl-Pulverzufuhrdüsen mit verbesserter Performance, Aachen
- [46] Brückner, F. (2012): Modellrechnungen zum Einfluss der Prozessführung beim induktiv unterstützten Laser-Pulver-Auftragschweißen auf die Entstehung von thermischen Spannungen, Rissen und Verzug, Fraunhofer Verlag, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Dresden
- [47] Zhu, G., Li, D., Zhang, A., Tang, Y. (2011): Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition. Optics & Laser Technology, 43(1), S. 106–113.
- [48] Lin, J., Hwang, B. C. (1999): Coaxial laser cladding on an inclined substrate. Optics & Laser Technology, 31(8), S. 571–578.
- [49] Liu, J., Li, L., Zhang, Y., Xie, X. (2005): Attenuation of laser power of a focused Gaussian beam during interaction between a laser and powder in coaxial laser cladding. Journal of Physics D: Applied Physics, 38(10), 1546.
- [50] Pinkerton, A. J. (2007): An analytical model of beam attenuation and powder heating during coaxial laser direct metal deposition. Journal of Physics D: Applied Physics, 40(23), 7323.
- [51] Pinkerton, A. J., Li, L. (2004): Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling. Journal of manufacturing science and engineering, 126(1), S. 33-41.
- [52] Giuliani, V., Hugo, R. J., Gu, P. (2009): Powder particle temperature distribution in laser deposition technologies. Rapid prototyping journal, 15(4), S. 244-254.
- [53] Pirch, N., Linnenbrink, S., Gasser, A., Wissenbach, K., Poprawe, R. (2017): Analysis of track formation during laser metal deposition. Journal of Laser Applications, 29(2), 022506.
- [54] Poprawe, R. (2005): Lasertechnik für die Fertigung. Deutschland: Springer Verlag, Berlin.
- [55] Liu, H., He, X., Yu, G., Wang, Z., Li, S., Zheng, C., Ning, W. (2015): Numerical simulation of powder transport behavior in laser cladding with coaxial powder feeding. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 58(10), 104701.
- [56] Kussin, J. (2004): Experimentelle Studien zur Partikelbewegung und Turbulenzmodifikation in einem horizontalen Kanal bei unterschiedlichen Wandrauigkeiten (Doctoral dissertation, Universitäts-und Landesbibliothek).

- [57] Kovalev, O. B., Zaitsev, A. V., Novichenko, D., Smurov, I. (2011): Theoretical and experimental investigation of gas flows, powder transport and heating in coaxial laser direct metal deposition (DMD) process. *Journal of thermal spray technology*, 20(3), S. 465–478.
- [58] Pan, H., Liou, F. (2005): Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(2), S. 230–244.
- [59] Pan, H., Sparks, T., Thakar, Y. D., Liou, F. (2006): The investigation of gravity-driven metal powder flow in coaxial nozzle for laser-aided direct metal deposition process. *Journal of manufacturing science and engineering*, 128(2), S. 541–553.
- [60] Elghobashi, S. (1994): On predicting particle-laden turbulent flows. *Applied scientific research*, 52(4), S. 309–329.
- [61] Wibel, W. (2009): Untersuchungen zu laminarer, transitioneller und turbulenter Strömung in rechteckigen Mikrokanälen, Dissertation
- [62] Kravtsov, M. V. (1968): Resistance to the free steady-state motion of a sphere in a viscous medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 15(3), S. 833–838.
- [63] Li, H. P., Chen, X. (2002): Three-dimensional modeling of the turbulent plasma jet impinging upon a flat plate and with transverse particle and carrier-gas injection. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 22(1), S. 27–58.
- [64] Haider, A., Levenspiel, O. (1989): Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder technology*, 58(1), S. 63–70.
- [65] Gerold, J. (2015). Experimentelle und numerische Untersuchung von Gas-Freistrahlen (Doctoral dissertation, Universität der Bundeswehr München).
- [66] Richter, F., Leder, A. (2006): Wechselwirkungen runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden. Dopheide, D.; Müller, H.; Strunck, V, 13-1.
- [67] Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent jets* (Vol. 5). Elsevier.
- [68] Wen, S. Y., Shin, Y. C., Murthy, J. Y., Sojka, P. E. (2009): Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(25-26), S. 5867–5877.
- [69] Lin, J. (2000): Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(1-2), S. 17–23.
- [70] Tabernero, I., Lamikiz, A., Ukar, E., de Lacalle, L. L., Angulo, C., Urbikain, G. (2010). Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), S. 2125–2134.
- [71] Zhang, A., Li, D., Zhou, Z., Zhu, G., Lu, B. (2010): Numerical simulation of powder flow field on coaxial powder nozzle in laser metal direct manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), S. 853–859.
- [72] Kovalev, O. B., Kovaleva, I. O., Smurov, I. Y. (2017): Numerical investigation of gas-disperse jet flows created by coaxial nozzles during the laser direct material deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, S. 118–127.
- [73] Yang, N. (2009). Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 41(1), S. 94–98.

- [74] Qi, H., Mazumder, J., Ki, H. (2006): Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition. *Journal of applied physics*, 100(2), 024903.
- [75] Liu, S., Zhang, Y., Kovacevic, R. (2015): Numerical simulation and experimental study of powder flow distribution in high power direct diode laser cladding process. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), S. 199–218.
- [76] Diniz Neto, O. O., Alcalde, A. M., Vilar, R. (2007): Interaction of a focused laser beam and a coaxial powder jet in laser surface processing. *Journal of Laser Applications*, 19(2), S. 84–88.
- [77] Pinkerton, A. J., Li, L. (2002): A verified model of the behaviour of the axial powder stream concentration from a coaxial laser cladding nozzle. In *Proceedings of ICALEO* (Vol. 2).
- [78] Lin, J. (1999): Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 31(8), S. 565–570.
- [79] Liu, C. Y., Lin, J. (2003): Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 35(2), S. 81–86.
- [80] Ibarra-Medina, J., Pinkerton, A. J. (2010): A CFD model of the laser, coaxial powder stream and substrate interaction in laser cladding. *Physics Procedia*, 5, S. 337–346.
- [81] Kaierle, S., Barroi, A., Noelke, C., Hermsdorf, J., Overmeyer, L., Haferkamp, H. (2012): Review on laser deposition welding: from micro to macro. *Physics Procedia*, 39, S. 336–345.
- [82] Partes, K., Seefeld, T., Sepold, G., Vollertsen, F. (2005, December): Increased efficiency in laser cladding by optimization of beam intensity and travel speed. In *Workshop on Laser Applications in Europe* (Vol. 6157, S. 615700). International Society for Optics and Photonics.
- [83] Arrizubieta, J. I., Lamikiz, A., Klocke, F., Martínez, S., Arntz, K., Ukar, E. (2017): Evaluation of the relevance of melt pool dynamics in Laser Material Deposition process modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, S. 80–91.
- [84] Gasser, A. (1993). *Oberflächenbehandlung metallischer Werkstoffe mit CO₂-Laserstrahlung in der flüssigen Phase*. Mainz.
- [85] Li, S., Wei, Z., Du, J., Wei, P., Hou, Z., Lu, B. (2015): The fusion process of successive droplets impinging onto a substrate surface. *Applied Physics A*, 120(1), S. 35–42.
- [86] Trapaga, G., Szekely, J. (1991). Mathematical modeling of the isothermal impingement of liquid droplets in spraying processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 22(6), S. 901–914.
- [87] Liu, H., Lavernia, E. J., Rangel, R. H. (1993): Numerical simulation of substrate impact and freezing of droplets in plasma spray processes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26(11), S. 1900.
- [88] Megaridis, C. M., Boomsma, K., Bayer, I. S. (2004): Partial rebound of molten-metal droplets impacting on solid substrates. *AIChE journal*, 50(7), S. 1356–1363.
- [89] Zhao, Z., Poulikakos, D., Fukai, J. (1996): Heat transfer and fluid dynamics during the collision of a liquid droplet on a substrate—I. Modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(13), S. 2771–2789.

- [90] Zhao, Z., Poulikakos, D., Fukai, J. (1996): Heat transfer and fluid dynamics during the collision of a liquid droplet on a substrate—II. Experiments. *International journal of heat and mass transfer*, 39(13), S. 2791–2802
- [91] Wang, C. H., Tsai, H. L., Wu, Y. C., Hwang, W. S. (2016): Investigation of molten metal droplet deposition and solidification for 3D printing techniques. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26(9), 095012
- [92] Li, S., Wei, Z., Du, J., Zhao, G., Wang, X., Lu, B. (2016): Numerical and experimental investigation of molten metal droplet deposition applied to rapid prototyping. *Applied Physics A*, 122(8), 784.
- [93] Xing, Y. Z., Liu, Z., Wang, G., Li, X. H., Xing, Y. L., Jiang, C. P., Dargusch, M. (2017): Effects of spray parameters on the adhesion between plasma-sprayed cast iron splat and aluminium substrate. *Surface and Coatings Technology*, 315, S. 1–8.
- [94] Chapuis, J., Romero, E., Soulié, F., Bordreuil, C., Fras, G. (2016): Transient behaviour of deposition of liquid metal droplets on a solid substrate. *Heat and Mass Transfer*, 52(10), S. 2283–2292.
- [95] Ghafouri-Azar, R., Shakeri, S., Chandra, S., Mostaghimi, J. (2003): Interactions between molten metal droplets impinging on a solid surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(8), S. 1395–1407.
- [96] Pirch, N., Niessen, M., Linnenbrink, S., Schopphoven, T., Gasser, A., Poprawe, R., Schulz, W. (2018): Temperature field and residual stress distribution for laser metal deposition. *Journal of Laser Applications*, 30(3), 032503.
- [97] Ibarra-Medina, J., Pinkerton, A. J. (2011): Numerical investigation of powder heating in coaxial laser metal deposition. *Surface Engineering*, 27(10), S. 754–761.
- [98] Partes, K. (2008): Hochgeschwindigkeitsbeschichten mit dem Laserstrahl, Dissertation, Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik, Bremen
- [99] Peyre, P., Aubry, P., Fabbro, R., Neveu, R., Longuet, A. (2008): Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(2), 025403.
- [100] Steen, W. M., Weerasinghe, V. M., Monson, P. (1986): Some aspects of the formation of laser clad tracks. In: *High Power Lasers and Their Industrial Applications* (Vol. 650, S. 226–235). International Society for Optics and Photonics.
- [101] Kreutz, E. W., Backes, G., Gasser, A., Wissenbach, K. (1995): Rapid prototyping with CO₂ laser radiation. *Applied Surface Science*, 86(1-4), S. 310–316.
- [102] Zhong, C., Gasser, A., Kittel, J., Schopphoven, T., Pirch, N., Fu, J., Poprawe, R. (2015): Study of process window development for high deposition-rate laser material deposition by using mixed processing parameters. *Journal of Laser Applications*, 27(3), 032008.
- [103] Costa, L., Felde, I., Reti, T., Kalazi, Z., Colaço, R., Vilar, R., Vero, B. (2003): A simplified semi-empirical method to select the processing parameters for laser clad coatings. In *Materials Science Forum* (Vol. 414, S. 385–394). Trans Tech Publications
- [104] De Oliveira, U., Ocelik, V., De Hosson, J. T. M. (2005): Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface and Coatings Technology*, 197(2-3), S. 127–136.
- [105] Sun, Y., Hao, M. (2012): Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd: YAG laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(7), S. 985–995.

- [106] El Cheikh, H., Courant, B., Branchu, S., Hascoet, J. Y., Guillén, R. (2012): Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(3), S. 413–422.
- [107] Beck, F., Brückner, F. et al. (2013): Hochproduktives Laser-Auftragschweißen mit Pulver und Draht. Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben Wirkungsgradsteigerung thermischer Beschichtungsanlagen durch Energiequellenkombination, Fraunhofer Verlag, Stuttgart
- [108] Nenadl, O., Ocelík, V., Palavra, A., De Hosson, J.T.M. (2015): Prediction of coating geometry: theory and experiment. *Surf. Eff. Contact Mech. Tribol. XII Comput. Methods Exp.*, 91, S. 177
- [109] El Cheikh, H., Courant, B., Hascoët, J.-Y., Guillén, R. (2012): Prediction and analytical description of the single laser track geometry in direct laser fabrication from process parameters and energy balance reasoning. *J. Mater. Process. Technol.*, 212, S. 1832–1839, 10.1016/j.jmatprotec.2012.03.016
- [110] Zhang, K. et al. (2012): Influences of Processing Parameters on Dilution Ratio of Laser Cladding Layer during Laser Metal Deposition Shaping, *Advanced Materials Research*, Vol. 549, S. 785–789
- [111] Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung, 2012. Verfahren und Vorrichtung zur Erfassung einer Partikeldichteverteilung im Strahl einer Düse. Erfinder: Dr. Gasser Andres, Dipl.-Ing. Mann Stefan, Dr. Pirch Norbert. Veröffentlichung: 02.08.2012. Anmeldung: 25.01.2011. DE, Patentschrift: DE102011009345B3
- [112] Wirth, F., Eisenbarth, D., Wegener, K. (2016): Absorptivity measurements and heat source modeling to simulate laser cladding. *Physics Procedia*, 83, S. 1424–1434.

9.2 Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
(r, Φ)	[---]	Zylinderkoordinaten
$\dot{m}_p$	[kg s ⁻¹]	Pulvermassenstrom
$\vec{n}$	[---]	Normalenvektor
A	[---]	Absorptionsgrad
$c_p(T)$	[m ² s ⁻² K ⁻¹]	Temperaturabhg. spez. Wärmekapazität d. Partikels
d_L	[m]	Laserstrahldurchmesser
d_p	[m]	Pulverfokusdurchmesser
$f(n)$	[---]	Dimensionslose Funktion abh. v. n
F_{abs}	[---]	Kumulierte Häufigkeit
F_{rel}	[---]	Relative Häufigkeit
h	[kg s ⁻³ K ⁻¹]	Wärmeübergangskoeffizient zw. Partikel u. Substrat
$I(S_i)$	[kg s ⁻³]	Laserstrahlungsintensität entlang der Partikeltrajektorie S_i
$I(x, y)$	[kg s ⁻³]	Laserstrahlungsintensitätsverteilung abhg. von x, y
$I(x, y, z, t)$	[kg s ⁻³]	Zeit- und ortsabhg. Laserstrahlungsintensitätsverteilung
I_0	[kg s ⁻³]	Normierungsfaktor f. Laserstrahlungsintensität
L_i	[m]	Weglänge durch den Strahlengang
n	[---]	Kap. 5.2: Partikelanzahl Kap. 5.5: Dimensionsloser Parameter
n	[---]	Anzahl detektierter Partikel
$N(0, \Delta\gamma^2)$	[---]	Normalverteilung mit Mittelwert 0, Varianz γ^2
$n(x, y, z)$	[m ⁻³]	Pulverpartikeldichteverteilung abhg. v. x, y, z
$N(\beta, \Delta\beta^2)$	[---]	Normalverteilung mit Mittelwert β , Varianz β^2
m_p	[kg]	Pulvermasse eines einzelnen Partikels
P_L	[kg m ² s ⁻³]	Laserleistung
r	[m]	Kap. 5.3: Düsendurchmesser Kap. 5.5: Strahlausdehnung
r_0	[m]	Strahlradius nach ISO 13694:2015
r_{Limit}	[m]	Grenzstrahlradius

r_p	[m]	Partikelradius
$r_{p,i}$	[m]	Partikelradius des i-ten Partikels
S_i	[m]	Partikeltrajektorie
T	[---]	Transmissionsgrad oder Temperatur
T_M	[K]	Schmelztemperatur
$T_{M,P}$	[K]	Schmelztemperatur Partikel
T_{max}	[K]	Maximaltemperatur
T_{min}	[K]	Minimaltemperatur
T_P	[K]	Partikeltemperatur
T_s	[K]	Substrattemperatur
U_P	[min ⁻¹]	Drehzahl Pulverdosierring
V_{FG}	[l/min]	Fördergas-Volumenstrom
v_p	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit
V_{SG}	[l/min]	Schutzgas-Volumenstrom
v_v	[m/s]	Vorschubgeschwindigkeit
z_1, z_2	[---]	Schnittebenen konst. Wahrscheinlichkeitsdichte
z	[m]	Kap. 6: Arbeitsabstand
β	[---]	Neigungswinkel d. Trajektorie rel. zur z-Achse
γ	[---]	Neigungswinkel d. Trajektorie rel. zur x-y-Achse
ΔT_i	[K]	Temperaturänderung d. Partikels i
$\Delta t_m, \Delta t$	[s]	Aufschmelzzeit
Δt_{max}	[s]	Zeit zur Erreichung der Maximaltemperatur
Δz	[m]	Höhe d. Messebene
ε	[---]	Emissionsgrad
λ	[m]	Wellenlänge
ρ_p	[kgm ⁻³]	Partikeldichte
σ	[kgm ² s ⁻² K ⁻¹]	Boltzmann-Konstante
$\Phi_1-\Phi_3$	N/A	Parameterkombinationen in [102]

9.3 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
CAM	Computer-aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
E	Messebene bei der Vermessung des Pulver-Gas-Strahls
EAD	Energy Area Density
ECHA	European Chemicals Agency
EHLA	Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen
MELT-X	Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserschmelzspritzen
EMD	Energy Mass Density
F&E	Forschung und Entwicklung
ST	Substrattemperatur
TG	Transmissionsgrad
PT	Partikeltemperatur
FEM	Finite-Elemente-Methode
HVOF	High-Velocity-Oxygen-Fuel
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie
KF	Kornfraktion
LA	Laserauftragschweißen
LärmVibrationsArbSchV	Lärmvibrationsarbeitsschutzverordnung
NURBS	Nicht-uniforme rationale B-Spline
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals
SVHC	Substances of Very High Concern
WHO	World Health Organization

Aufgrund aktueller sowohl ökologischer als auch ökonomischer Randbedingungen besteht bei einer Vielzahl von Dienstleistern und Endanwendern ein großer Bedarf an neuartigen, umweltschonenden, automatisierbaren und gleichzeitig wirtschaftlichen Beschichtungsverfahren mit großer Schichtqualität. Ein neuer, innovativer Ansatz für das Laserauftragschweißen mit pulverförmigen Zusatzwerkstoffen, das »Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen EHLA«, bietet das große Potenzial, diesen Herausforderungen zu begegnen. In der vorliegenden Arbeit werden erstmalig die Werkzeuge bzw. Methoden beschrieben, mit denen die prozessrelevanten Einflussgrößen wie Transmissionsgrad, Partikelerwärmung im Strahlengang, Erwärmung des Substrates und Spurbildung beschrieben werden können. Das dadurch geschaffene Prozessverständnis bildet die Basis, um die technologischen Grenzen des EHLA-Verfahrens, z.B. hinsichtlich erreichbarer Vorschubgeschwindigkeit oder Spurbildung abschätzen zu können und durch Verschieben der Prozessgrenzen die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens für die Produktion – insbesondere in der Oberflächentechnik, aber auch bei der Reparatur und der additiven Fertigung – nachhaltig zu vergrößern.

ISBN 978-3-8396-1587-4



9 783839 615874