

**Verfahrensentwicklung und theoretische
Betrachtungen zum lasergestützten
3D-Mikro-Auftragschweißen**

Vom Fachbereich Maschinenbau der
Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Hinrich Becker
geboren am 27.05.1968 in Hannover

2004

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. D. Mewes

3. Referent Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer

Tag der Promotion: 17. November 2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp, dem ehemaligen Direktor des Instituts für Werkstoffkunde der Universität Hannover und Vorstandsmitglied des Laser Zentrum Hannover e.V., für die Aufgabenstellung und seine wohlwollende Unterstützung, ohne die die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Mewes, dem Direktor des Instituts für Verfahrenstechnik der Universität Hannover, danke ich für seine Anregungen und für die Übernahme des Koreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer, dem Direktor des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik der Universität Hannover, gilt mein Dank für die Übernahme des zweiten Koreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach, dem Direktor des Instituts für Werkstoffkunde der Universität Hannover, gilt mein Dank für die freundliche Prüfungsleitung.

Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank all meinen Kollegen, insbesondere denen der Abteilung „Werkstoff- und Prozesstechnik“, den Studenten sowie den technischen Mitarbeitern des Laser Zentrum Hannover e.V. für die kooperative Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen.

Teile der Arbeit wurden von der Europäischen Union im Programm „Competitive and Sustainable Growth“ im fünften Rahmenprogramm im Rahmen des Projektes G1RD-CT2000-00195 gefördert.

Hannover, im November 2004

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	VII
Formelzeichen	VII
Abkürzungen	X
Tiefgestellte Indizes	XI
Naturkonstanten.....	XII
Abstract	XIII
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	3
2.1 Rapid Prototyping und seine Anwendungen.....	3
2.2 Rapid Prototyping Systeme zur direkten Herstellung von Funktionsprototypen	5
2.2.1 Stereolithografie	5
2.2.2 Laserstrahlsintern.....	6
2.2.3 Three Dimensional Printing	8
2.2.4 Laminated Object Manufacturing	9
2.2.5 Fused Deposition Modeling	9
2.2.6 3D-Laserstrahlauftragschweißen.....	10
2.3 Entwicklungen innerhalb der Mikrosystemtechnik.....	12
2.3.1 Mikrophotoverfestigung mittels LCD-Maskentechnik (MPL).....	15
2.3.2 Rapid Micro Product Development (RMPD).....	16
2.3.3 Laserstrahlmikrosintern (LSMS).....	19
2.3.4 Liquid Metal Jet Printing (LMJP)	21
3 ZIELSETZUNG DER ARBEIT.....	23
4 LÖSUNGSKONZEPT UND VORGEHENSWEISE	25

5	TECHNOLOGIE DES 3D-LASERSTRAHLAUFTRAGSCHWEIßENS	27
5.1	Verfahrensprinzip des 3D-Laserstrahlaufragschweißens	27
5.2	Verfahrensparameter des 3D-Laserstrahlaufragschweißens	28
5.3	Strahl-Stoff-Wechselwirkung	31
6	ENTWICKLUNG UND QUALIFIZIERUNG DER VERSUCHSANLAGE	36
6.1	Strahlerzeugung, -führung, -formung und -regelung (HB-1).....	38
6.1.1	Strahlerzeugung und -eigenschaften.....	38
6.1.1.1	Laserstrahlquelle	38
6.1.1.2	Charakterisierung des Rohstrahls	39
6.1.1.3	Charakterisierung des fokussierten Strahls	40
6.1.1.4	Charakterisierung der Laserstrahlleistung	42
6.1.2	Strahlformung und -führung	43
6.1.3	Temperaturmessung und Regelung der Laserstrahlleistung.....	44
6.2	Zusatzwerkstofftransport und -fokussierung (HB-2)	47
6.3	Peripheriekomponenten (HB-3)	49
6.3.1	Handhabungssystem.....	49
6.3.2	Integration eines Restsauerstoffmessgerätes	49
6.3.3	Auslegung der Schutzgaskammer.....	50
6.3.4	Integration einer Abstandssensorik	51
6.3.5	Integration eines Strahlvermessungssystems	52
6.3.6	Integration eines Miniaturmikroskops	52
6.4	Automatisierung (HB-4).....	53
7	VERSUCHSWERKSTOFFE UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	54
7.1	Substrat- und Zusatzwerkstoff	54
7.2	Prozessgase	55
7.3	Versuchsdurchführung	56
8	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	60

8.1	Schweißergebnisse und Beurteilung der Schweißnahteigenschaften	60
8.2	Prozessangepasste Systemtechnik	71
8.2.1	Aerodynamische Partikelfokussierung	71
8.2.1.1	Die partikelbeladene Zweiphasenströmung.....	72
8.2.1.2	Numerische Strömungsanalyse.....	76
8.2.2	Elektrostatische Partikelfokussierung.....	78
8.2.2.1	Aufladung von Partikeln.....	79
8.2.2.2	Abschätzung der Partikelaufladung.....	82
8.2.2.3	Manipulation der geladenen Partikel	86
8.2.3	Simulationen der Partikelbewegung.....	88
8.2.3.1	Modell 1: Ganzflächenpotentialpaarung.....	90
8.2.3.2	Modell 2: Mehrfachsegmentpotentialpaarung.....	93
8.2.3.3	Modell 3: Einfachsegmentpotentialpaarung.....	96
	8.2.3.3.1 Einfluss der Partikelgeschwindigkeit.....	99
	8.2.3.3.2 Einfluss der Elektronenladungen	100
	8.2.3.3.3 Einfluss des Partikeldurchmessers.....	102
9	FOLGERUNGEN UND AUSBLICK	106
10	ZUSAMMENFASSUNG	108
11	LITERATURVERZEICHNIS.....	111

Formelzeichen und Abkürzungen**Formelzeichen**

Zeichen	Benennung	Einheit
α_{Mie}	Mie Parameter	-
β_{Mie}	Mie Parameter	-
$\Delta\psi$	Potentialdifferenz	V
λ	Wellenlänge	nm
λ_0	Wellenlänge im Vakuum	nm
Θ	Divergenzwinkel realer Laserstrahl	°
θ	Divergenzwinkel idealer Strahl	°
ν	Kinematische Viskosität	m ² /s
σ_{abs}	Wirkungsquerschnitt für die Absorption	m ²
σ_{ext}	Wirkungsquerschnitt für die Extinktion	m ²
σ_{sca}	Wirkungsquerschnitt für die Streuung	m ²
ρ	Dichte	g/cm ³
A	Absorptionsgrad	%
Ab_{max}	Maximale Abweichung	%
A_{LS}	Laserstrahlquerschnittsfläche	mm ²
a_{LS}	Laserstrahlversatz	mm
a_E	Beschleunigung im elektrischen Feld	m/s ²
a_k	Mie Koeffizient zur Bestimmung der Effizienzfaktoren	-
b_B	Bauteilbreite	mm
b_k	Mie Koeffizient zur Bestimmung der Effizienzfaktoren	-
b_{Sp}	Spurbreite	mm
D_{Fl}	Verweilzeit der Partikel im Laserstrahl	s
d	Durchmesser	mm
d_{LS}	Durchmesser Laserstrahl	mm
d_k	Kristalldurchmesser	mm
d_P	Partikeldurchmesser	mm
E	Leistungsdichte Laserstrahl	W/mm ²
E_E	Elektrische Feldstärke	V/m
E_F	Flächenenergie	J/mm ²

E_{St}	Streckenenergie	J/mm
F_E	Kraft durch elektrisches Feld	N
h_B	Bauteilhöhe	mm
h_{Sp}	Spurhöhe	mm
I_0	Ausgangsintensität	W
I_{x_L}	Intensität nach Durchlaufen einer Strecke x_L	W
KG	Konturgenauigkeit	mm
k	Laufkoordinate zur Bestimmung der Effizienzfaktoren	-
L_1	Länge Kondensator	mm
L_2	Betrachtete Länge nach Kondensator	mm
l_s	Strahlweglänge	mm
M^2	Beugungsmaßzahl	-
m_P	Masse Einzelpartikel	kg
\dot{m}_P	Massenstrom	g/s
n_1	Brechungsindex 1	-
n_2	Brechungsindex 2	-
n_P	Partikelanzahldichte	$1/m^3$
O_P	Partikeloberfläche	mm^2
P_L	Laserstrahlleistung	W
P_A	Absorbierter Anteil der Laserstrahlleistung	W
P_R	Reflektierter Anteil der Laserstrahlleistung	W
P_T	Transmissiver Anteil der Laserstrahlleistung	W
p	Druck	Pa
Q_{abs}	Effizienzfaktor Absorption	-
Q_{ext}	Effizienzfaktor Extinktion	-
$Q_{Fitkurve}$	Fitkurve der Ladungen	C
$Q_{Fitkurve_Lit}$	Fitkurve der Ladungen aus Literaturangaben	C
Q_i	Effizienzfaktor i	-
Q_m	Spezifische Ladung	C/kg
Q_{m_Lit}	Spezifische Ladung errechnet aus Literaturangaben	C/kg
Q_{m_max}	Maximale spezifische Ladung	C/kg
Q_P	Partikelladung	C
Q_{P_Lit}	Partikelladung aus Literaturangaben	C
$Q_{P_Sät}$	Sättigungsladung Partikel	C
Q_s	Oberflächliche Ladungsdichte	C/mm^2

Q_{sca}	Effizienzfaktor Streuung	-
Q_{s_Lit}	Oberflächliche Ladungsdichte aus Literaturangaben	C/mm ²
Q_{s_max}	Maximale oberflächliche Ladung	C/mm ²
R	Reflexionsgrad	%
R_a	Mittenrauhwert	µm
Re	Reynoldszahl	-
Re_{Ext}	Realanteil der Mie Koeffizienten	-
$R(z)$	Krümmungsradius der Wellenfront im Punkt z	mm
r_P	Partikelradius	mm
r_{LS}	Laserstrahlradius	µm
T	Transmissionsgrad	%
t	Zeit	s
t_B	Bauteiltiefe	mm
t_k	Kristalldicke	mm
t_{EW}	Einwirkzeit der Laserstrahlung	s
u	Geschwindigkeitskomponente in Navier-Stokes-Gleichung	m/s
\ddot{U}_{Sp}	Spurüberlappungsgrad	-
V_{LS}	Volumen Laserstrahl	mm ³
V_P	Volumen Partikel	mm ³
v	Geschwindigkeitskomponente in Navier-Stokes-Gleichung	m/s
v_a	Axiale Geschwindigkeitskomponente	mm/s
v_M	Vorschub Medium	mm/s
v_P	Partikelgeschwindigkeit	mm/s
v_r	Radiale Geschwindigkeitskomponente	mm/s
v_{Sub}	Vorschub Substrat	mm/s
v_{TG}	Geschwindigkeit des Trägergasstromes	mm/s
WG	Wiederholgenauigkeit	mm
w	Geschwindigkeitskomponente in Navier-Stokes-Gleichung	m/s
$w(z)$	Strahlradius im Punkt z	mm
w_0	Strahltaillenradius	mm
x	Ortskoordinate	mm
x_{ges}	Gesamtablenkung	mm
x_1	Ablenkung des Partikels nach Austritt Kondensator	mm
x_2	Ablenkung des Partikels in einer Entfernung L_2	mm
x_L	Laufkoordinate einer Strecke x	mm

y	Ortskoordinate	mm
z	Ortskoordinate	mm
z ₀	Ortskoordinate z an Strahltaile	mm

Abkürzungen

Abkürzung	Benennung
AP	Außenpotential
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
CFD	Combined Field Diffusion
CFD	Computational Fluid Dynamics
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
FAD	Field Assisted Diffusion
FDM	Fused Deposition Modeling
FDMC	Fused Deposition of Multiple Ceramics
FMD	Field Modified Diffusion
GPIB	General Purpose Interface Bus
HALO	Hoch-Apertur-Laser-Objektiv
HB	Hauptblock
IP	Innenpotential
IT	Intelligent Technologies
ITT	Ion Track Technology
LCD	Liquid crystal display
LDC	Laser Direct Cladding
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LIGA	Lithografie, Galvanoformung und Abformung
LMJP	Liquid Metal Jet Printing
LOM	Laminated Object Manufacturing
LS	Laserstrahl
LSMS	Laserstrahlmikrosintern
MPL	Mikrophotoverfestigung mittels LCD-Maskentechnik

MpCCI	Mesh based parallel Code Coupling Interface
MST	Mikrosystemtechnik
N.A.	Numerische Apertur
NC	Numerical Control
Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium Granat
NEXUS	Network of Excellence on Multifunctional Microsystems
n.a.	Nicht angegeben
PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PID	Proportional Integral Differential
PV	Partikelverteilung
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation
REM	Rasterelektronenmikroskop
RMPD	Rapid Micro Product Development
RP	Rapid Prototyping
SLC	Selective Laser Cladding
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography Data Format
TEM ₀₀	Transversale Elektromagnetische Grundmode
UV	Ultraviolett
VXI	VMEbus eXtensions for Instrumentation
Yb:YAG	Ytterbium:Yttrium-Aluminium Granat

Tiefgestellte Indizes

Index	Bedeutung
A	Absorbierter Anteil
Ab	Abstand
a	Axial
abs	Absorption
B	Bauteil
E	Elektrisches Feld
EW	Einwirkzeit
ext	Extinktion
F	Fläche

Fl	Flug
ges	Gesamt
k	Koeffizient
LS	Laserstrahl
M	Medium
m	Spezifisch
max	Maximal
min	Minimal
L	Laser
Lit	Literatur
P	Partikel
R	Reflektierter Anteil
r	Radial
s	Oberflächlich
Sät	Sättigung
Sp	Spur
St	Strecke
Sub	Substrat
sca	Gestreuter Anteil
T	Transmittierter Anteil

Naturkonstanten

π	Kreiskonstante	3,14159
e	Konstante	$\sqrt{2,71828}$
g	Gravitationsbeschleunigung	9,807 m/s ²

Abstract

Das stetig steigende Weltmarktvolumen im Bereich der Mikrosystemtechnik stellt immer höhere Ansprüche an die Mikroproduktionstechniken, innerhalb derer noch Defizite bezüglich der Fertigung von metallischen Bauteilen mit Gesamtabmessungen von nur wenigen Millimetern und kleinsten Strukturen im Bereich weniger Mikrometer bestehen. Als nachteilig gestaltet sich bei den speziell für die Mikrobauaufbereitung entwickelten lithografischen Verfahren eine geringe Fertigungsflexibilität, während bei den spanabhebenden Techniken u. a. das formgebende Werkzeug die minimale Größe sowie die Auflösung der zu fertigenden Bauteile begrenzt.

Die Verfahren aus dem Bereich des Rapid Prototyping stellen mittlerweile anerkannte und aus der Produktentwicklung nicht mehr weg zu denkende Instrumente der Bauteilfertigung dar, wobei insbesondere das makroskopische 3D-Laserstrahlaufragschweißen sein hohes Potential bei der flexiblen Fertigung von metallischen Bauteilen bewiesen hat. Neue Entwicklungen im Bereich der Strahlquellen eröffnen Möglichkeiten, dieses Verfahren auch für die Herstellung von Mikrobauaufbereitung zu nutzen. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung eines geeigneten Anlagenkonzeptes für das 3D-Mikro-Auftragschweißen, das durch theoretische Überlegungen sowie experimentelle Untersuchungen qualifiziert wird.

Die entwickelte, vollautomatisch handhabbare Anlage beinhaltet einen Yb:YAG-Scheibenlaser, mit dem Laserstrahlfokusdurchmesser unterhalb von $10\ \mu\text{m}$ erzeugt werden können. Zur Qualitätssicherung ist in die Anlage eine pyrometrische Temperaturregelung integriert worden, die anhand eines auf nur $50\ \mu\text{m}$ fokussierbaren Messflecks die Temperaturen im Schweißbad kontrolliert. Der Prozess findet in einer ebenfalls überwachten Schutzgaskammer statt, in der Atmosphären mit einem Sauerstoffgehalt unterhalb $100\ \text{ppm}$ garantiert werden können. Die aerodynamische Mikropartikelförderung wird durch entwickelte Kombinationsverfahren ermöglicht, die Fokussierung in das Schmelzbad erfolgt durch eine koaxiale Düse.

Experimentelle Untersuchungen bestätigen das hohe Potential des Verfahrens, mit dem Schweißlagen kleiner $15\ \mu\text{m}$ erzeugt werden können, decken jedoch auch Defizite innerhalb der aerodynamischen Partikelfokussierung auf. Zur Kompensation wird ein neues, elektrostatisches Verfahren zur Erzeugung von extrem kleinen Partikelfokusdurchmessern vorgeschlagen. Dieses führt durch umfangreiche Simulationsarbeiten zu einem Modell, das unter Verwendung realer Materialdaten eine berechnete Fokussierung auf einen Bereich kleiner $50\ \mu\text{m}$ ermöglicht. Dadurch wird eine Kompensation der detektierten Defizite innerhalb des Verfahrens erwartet.

Schlagwörter: Rapid Prototyping, Mikro-Auftragschweißen, Partikelfokussierung

Abstract

The steadily rising world market volume in the micro system technology area has made higher and higher claims on the micro production technologies so that there is still a shortage in the production of metallic components with total dimensions of only few millimeters and the smallest structures are in the few micrometer range. It is disadvantageous that the manufacturing quality of the lithographic process developed especially for micro-machining is low, while at the same time, for cutting technologies etc., the machining tool itself places limits on both the minimal size and the resolution of the part to be manufactured.

Currently, the methods of the rapid prototyping area are approved and in relation to the product development one of the most essential instruments of the component manufacturing, in which particularly the macroscopic 3D laser beam cladding has proved its high potential with regard to flexible manufacturing of metallic components. New developments in the beam sources area open possibilities of using this method also for the production of micro components. Hence, the subject of the present work is the development of a suitable system concept for 3D micro cladding. This concept has been qualified by theoretical considerations as well as experimental investigations.

The developed, fully automatically manageable facility contains a Yb:YAG disc laser of a laser beam focus diameter to be set below 10 μm . As for quality assurance, a pyrometric temperature regulation has been integrated into the facility, which controls the temperatures in the welding bath with the help of a focusable measuring spot down to 50 μm . The process takes place in a likewise controlled protection gas chamber in which atmospheres with an oxygen content below 100 ppm can be guaranteed. The aerodynamic micro particle delivery will be possible with the help of developed combination procedures. The focusing in the melting pool occurs through a coaxial nozzle.

Experimental investigations confirm the high potential of this method through which welding layers smaller than 15 μm can be generated. However, the experimental investigations detect deficits within the aerodynamic particle focusing. As compensation, this work presents a new electrostatic method to produce extremely small diameters for the particle focus. This led, through extensive simulation with real material data, to a model which allows a calculated focusing in an area smaller than 50 μm . A compensation of the detected deficits within the method is thereby expected.

Keywords: Rapid Prototyping, micro cladding, particle focusing

1 Einleitung

Mit der Einführung des ersten industriell verfügbaren Rapid Prototyping Systems im Jahr 1987, basierend auf der Stereolithografie, begann eine für den Prototypenbau revolutionäre Entwicklung. Mit dem System ließen sich nicht nur markt- und kundengerechte Produkte durch einen generativen Bauprozess schnell und individuell direkt aus digitalen Daten entwickeln, sondern auch Prozessketten effizienter gestalten und umsetzen.[1]

Der Stereolithografie folgten weitere Technologieansätze, die zur Weiterentwicklung einer Vielzahl von Verfahren geführt haben. Beispielhaft stehen hierfür die Verfahren Laminated Object Manufacturing (LOM), Fused Deposition Modeling (FDM), die Verfahren des Laserstrahlsinterns (SLS, DMLS) und des lasergestützten 3D-Auftragschweißens (LENS). Während in den Anfangsjahren der Rapid Prototyping-Entwicklungen die Hauptmotivation aufgrund von Verfahrenseinschränkungen hinsichtlich der verwendbaren Materialien, der erreichbaren Festigkeit und Geometrietreue in der Visualisierung von Bauteilen lag, verlagert sich der Einsatz heute durch kontinuierliche Verbesserungen innerhalb der angebotenen Systeme zusehends in Richtung Funktionsprototypen mit realbauteilähnlichen oder besser gleichen Eigenschaften.

Vergleichbar revolutionäre Entwicklungen ergeben sich heutzutage im Bereich der Mikrosystemtechnik mit Auflösungen im unteren Mikrometerbereich, die bereits jetzt als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts bezeichnet wird [2] und deren Erschließung völlig neuer, heute nur ansatzweise erkennbarer Einsatzgebiete noch aussteht.[3] Die innerhalb der Mikrosystemtechnik verwendeten Mikrotechniken schaffen hierbei die technologischen Voraussetzungen für die Miniaturisierung und Systemfähigkeit der einzelnen Funktionen bzw. Komponenten des Mikrosystems. Ermöglicht wird die Herstellung derartiger Systeme durch speziell entwickelte Fertigungsverfahren (z. B. die Lithografie) oder durch Kombinationsverfahren wie z. B. das LIGA-Verfahren, das die Verfahren der Lithografie, der Galvanoformung und der Abformung miteinander verbindet. Gemeinsam haben diese Verfahren, dass sie mit hohen Investitionskosten verbunden sind und sich hierdurch nur bei sehr hohen Stückzahlen rentieren. Neuere Methoden, wie z. B. die spanabhebende Bearbeitung meist metallischer Oberflächen, erlauben Strukturhöhen bis zu einem Millimeter bei einer Strukturgenauigkeit von etwa ein bis zwei Mikrometer und Rauheitswerten von R_a im Bereich von 10 Nanometern.[4] Diese Verfahren erweisen sich jedoch in vielen Fällen aus Kostengründen für eine direkte Produktfertigung als weniger geeignet und werden daher vielmehr für die Herstellung von Abformwerkzeugen für Heißpräge- und Spritzgussverfahren benutzt.

Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Entwicklung einer Verfahrenstechnologie zum lasergestützten 3D-Mikro-Auftragschweißen zur direkten Herstellung von metallischen Mikrostrukturen und -bauteilen mit Auflösungen im unteren Mikrometerbereich leisten. Hierzu werden zunächst wesentliche Inhalte des Verfahrensprinzips des 3D-Laserstrahlaufragschweißens vorgestellt und wichtige, für das Verständnis der Technologie notwendige Verfahrensparameter unter Einbeziehung der Strahl-Stoff-Wechselwirkungen untersucht.

Basierend auf den erarbeiteten Inhalten erfolgt die Konzeptionierung und Entwicklung der Anlagenkomponenten und deren Integration in ein Gesamtmaschinenkonzept. Nach der Qualifizierung der Versuchsanlage, insbesondere hinsichtlich erreichbarer Strahl- und damit eng verbunden erreichbarer Strukturabmessungen, erfolgen erste Schweißuntersuchungen, die einer Potentialabschätzung des Verfahrens dienen.

Aus der Beurteilung der Schweißnahteigenschaften erfolgt die Ableitung einer prozessangepassten Systemtechnik zur Mikropartikelfokussierung, die durch Modellbildung und Simulation qualifiziert wird. Inhalt der Berechnungen sind die Flugbahnänderungen elektrisch geladener Partikel beim Passieren eines elektrisch induzierten Feldes mit dem Ziel, die bei der aerodynamischen Mikropartikelfokussierung vorhandenen Defizite zu kompensieren.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Rapid Prototyping und seine Anwendungen

Der Begriff Rapid Prototyping (RP) beinhaltet die physische Modellierung eines Objektes durch die Verwendung von besonderen Systemtechniken. Mit Hilfe solcher Systeme können in kurzer Zeit Modelle und Prototypen aus Modelldaten von 3D-Digitalisierungssystemen erstellt werden. Das Grundprinzip aller Rapid Prototyping Verfahren ist dabei immer in zwei Teilschritte unterteilt, dem Generieren eines Querschnittes in der x-, y-Ebene und dem Verbinden dieser Schicht mit der Vorhergehenden in z-Richtung. Verwendung hierbei finden feste, flüssige und pulverförmige Materialien in Abhängigkeit des angewandten Verfahrens. Neben dem Begriff Rapid Prototyping werden in der Literatur in demselben Zusammenhang eine Vielzahl anderer Begriffe verwendet, wie z. B. Solid Freeform Manufacturing, Desktop Manufacturing oder auch Layer Manufacturing.

Die Anfertigung von Rapid Prototyping Modellen in den unterschiedlichen Stufen der Produktentwicklung führte zur Einteilung in Modelltypen (auch Modellarten oder Prototyparten), die eine Zuordnung in Bezug auf Genauigkeit und Einsatzmöglichkeiten zulässt. In Übereinstimmung mit den führenden Anlagenherstellern von Rapid Prototyping Anlagen sind vier Modellarten festgelegt worden.[5,6,7]

Konzeptmodelle, Designprototypen

Visualisierung von Proportionen und des grundsätzlichen Erscheinungsbildes. Verwendung in der Planung und Definitionsphase eines Entwicklungsprozesses.

Geometrieprototypen

Herstellung in der Konzeptions- und Entwurfsphase zur Überprüfung der Handhabung, Bedienung und Benutzung sowie der Visualisierung der exakten Form inklusive der gewünschten Oberflächenqualitäten.

Funktionsprototypen

Ermöglichen die Überprüfung einer oder mehrerer Funktionen innerhalb der Konstruktions- und Ausarbeitungsphase.

Technische Prototypen

Entsprechen weitgehend dem Serienmodell und werden nach den Fertigungsunterlagen erstellt. Im Vergleich zum Serienmodell sind abweichende Materialien und geometrische Vereinfachungen möglich. Wesentlicher Unterschied liegt im Fertigungsverfahren.

In der folgenden Abbildung 1 ist das Ergebnis einer repräsentativen Anfrage an 16 Systemhersteller von RP-Anlagen und 47 Dienstleister aus dem RP-Bereich dargestellt, bei der das Einsatzgebiet der erstellten Modellarten zugeordnet worden ist. Etwa 35 % aller RP-Modelle werden lt. Anfrage zur Prüfung von Passgenauigkeit und Funktion eingesetzt (sogenannte Geometrie- und Funktionsprototypen). Etwa 30 % dienen als Anschauungsmuster bei der Konstruktion, Werkzeugherstellung sowie bei der Einholung von Angeboten und bei Präsentationen. Über 23 % der Modellarten werden als Modelle für Prototypen-Werkzeuge und Metallguss sowie für Werkzeugeinsätze verwendet.

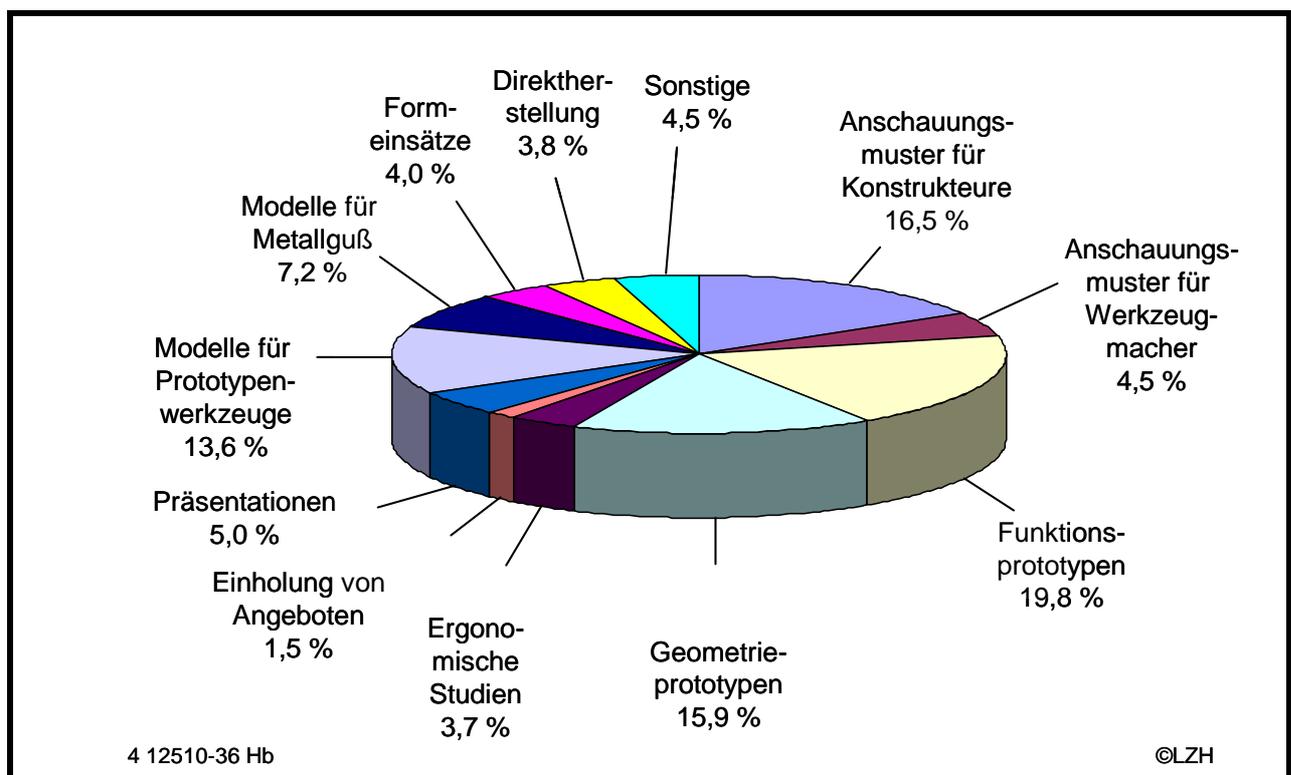


Abbildung 1: Einsatzgebiete für RP-Modelle [1]

Während in den Anfangsjahren der RP-Entwicklungen aufgrund von Verfahrenseinschränkungen (Material, Festigkeit, Geometrietreue) die Hauptmotivation zum Einsatz von Rapid Prototyping Verfahren in der Visualisierung von Bauteilen lag, verlagert sich der Einsatz heute durch kontinuierliche Verbesserungen innerhalb der angebotenen Systeme zusehends in Richtung Funktionsprototypen mit realbauteilähnlichen oder idealerweise gleichen Eigenschaften.

Trotz der Vielzahl der am Markt vorhandenen Systeme besteht sowohl in diesen Fertigungsverfahren selbst als auch in den entsprechenden Folgetechnologien ein enormes Verbesserungspotential hinsichtlich der Materialvielfalt und der Genauigkeit.[6] Immer noch als ungelöst gilt hierbei z. B. die direkte einstufige Herstellung von metallischen

Funktionsprototypen mit hohen Festigkeitsanforderungen und hohen geometrischen Auflösungen.[8]

Im Folgenden sollen daher die wichtigsten Verfahren zur direkten Herstellung von Funktionsprototypen kurz vorgestellt werden. Insbesondere sollen die Genauigkeiten der konventionell am Markt erhältlichen Systeme aufgezeigt und bezüglich der Möglichkeit eines Einsatzes zur Herstellung von metallischen Bauteilen eingestuft werden.

2.2 Rapid Prototyping Systeme zur direkten Herstellung von Funktionsprototypen

2.2.1 Stereolithografie

Die Stereolithografie ist das älteste und verbreitetste Rapid Prototyping Verfahren mit dem höchsten technologischen Reifegrad. Die Herstellung der Bauteilgeometrie erfolgt hierbei durch die schichtweise Photopolymerisation flüssig vorliegender Acryl- oder Epoxydharze unter Lichteinwirkung. Das zur Auslösung der Photopolymerisation benötigte Licht der entsprechenden Wellenlänge wird durch Laserstrahlung hervorgerufen. Verwendet werden vornehmlich Helium-Cadmium-Laser, Argon-Ionen-Laser oder frequenzverdreifachte Nd:YAG-Laser, da die derzeit verwendeten Photopolymerharze ihre optimale Absorption bei Wellenlängen zwischen 310 und 355 nm aufweisen. Da die erreichbare Auflösung und damit die Fertigungsgenauigkeit wesentlich von der verwendeten Laserstrahlquelle abhängen, kommt der Strahlqualität eine große Bedeutung zu.

Während des Bauprozesses wird der Laserstrahl entweder durch eine x-, y-Scannereinheit entsprechend der mittels „slicing“ aus dem CAD-Modell generierten Querschnittsflächen über die Oberfläche des flüssigen Polymerbades geführt, oder die Belichtung erfolgt durch die Verwendung von Masken, wodurch das Photopolymer an den entsprechenden Stellen polymerisiert. Das Bauteil wird auf einem Werkstückträger aufgebaut, der sich zu Beginn des Prozesses direkt unter der Badoberfläche befindet. Nachdem die erste Schicht des späteren Prototyps entstanden ist, wird die Trägerplattform um die gewünschte Schichtdicke abgesenkt, wodurch der flüssige Kunststoff auf die bereits ausgehärtete Fläche nachläuft. Auf diese Weise wird eine Schicht nach der anderen verfestigt und mit der vorherigen verbunden. Nach Fertigstellung des Modells wird die Plattform aus dem flüssigen Polymer herausgefahren und das Modell im Anschluss in einem Ofen unter UV-Licht nachgehärtet.[9,10,11,12,13,14]

Die mit dieser Technologie erreichbaren Genauigkeiten sind stark hersteller- und anlagenabhängig und bewegen sich im zweistelligen Mikrometerbereich (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Erzielbare Genauigkeiten innerhalb der konventionellen Stereolithografie [15,16,36]

System-lieferant	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
	x-,y- KG mm	x-,y- WG mm	z- KG mm	z- WG mm	v _M mm/s	b _{Sp} mm	h _{Sp} mm	KG mm	WG mm
System-lieferant A	material-abhängig	n. a.	0,1	material-abhängig	12-50	0,23-0,28	0,0254-0,127	0,05	0,001
System-lieferant B	+/- 0,05	n. a.	+/-0,5	n. a.	200	>0,1	>0,1	0,05-0,1 %	n. a.
System-lieferant C	+/-0,02	0,002	+/-0,1	+/-0,1	0-1000	0,1	>0,1	+/-0,1	+/-0,1
System-lieferant D	+/-0,025	n. a.	0,06	n. a.	n. a.	n. a.	0,05-0,25	n. a.	n. a.

Wurden bislang mit diesem Verfahren lediglich Bauteile aus verschiedenen Photopolymeren hergestellt, beschäftigen sich neuere Arbeiten mit der Erzeugung von metallischen und keramischen Bauteilen. Zu diesem Zweck werden die Suspensionen mit Pulvern geringer Korngröße vermischt und im anschließenden Stereolithografie-Verfahren polymerisiert. Im Anschluss hieran findet eine Wärmebehandlung statt, die der Entfernung des polymerischen Bindemittels dient, und in der die Teilchen durch entsprechende Temperaturzyklen zu Bauteilen mit einer in Abhängigkeit des Feststoffanteils theoretisch erreichbaren Dichte von bis zu 97 % versintert werden können.[17,18]

2.2.2 Laserstrahlsintern

Ein Rapid Prototyping Verfahren, das sich durch seine Vielseitigkeit bei den verarbeitbaren Materialien hervorhebt, ist das Laserstrahlsintern. Prinzipiell können mit diesem Verfahren sämtliche thermisch schmelzbaren Materialien, die in pulverförmigen Zustand erhältlich sind, verarbeitet werden. Zur Marktreife entwickelt wurden bisher amorphe und kristalline bzw. teilkristalline Thermoplaste, Croningsand sowie Keramik in kunststoffummantelter Form.[19,20,21,22] Neuere Entwicklungen arbeiten u. a. mit Metallpulvergemischen [23,24,25,26,27,28,29], innerhalb deren Verarbeitung es prinzipiell eine indirekte und eine direkte Verfahrensvariante gibt, wobei an dieser Stelle nur die letztere Variante erläutert werden soll:

Ein heterogenes Pulvergemisch aus verschiedenen reinen Metallen bzw. Metalllegierungen unterschiedlicher Schmelzpunkte wird in einem zweistufigen Verfahren zu einem

Körper gesintert. Die im Pulver enthaltene niedrigschmelzende Komponente wird durch die Energie des Laserstrahls aufgeschmolzen, umschließt die hochschmelzende Komponente und fungiert hierbei als Binder. Der eigentliche Prozessablauf beim Laserstrahlsintern besteht aus sich pro erzeugten Schichten wiederholenden Teilschritten. Zunächst erfolgt die Absenkung einer Substratplatte, auf derer der Körper erzeugt werden soll, um eine Schichthöhe. Parallel erfolgt die Anhebung einer mit Pulverwerkstoff gefüllten Dosierplattform in der Form, dass genügend Pulver für die zu erzeugende Schicht bereitgestellt werden kann. Durch eine Makelvorrichtung wird das durch die Dosierplattform bereitgestellte Pulver auf der Substratplatte gleichmäßig verteilt. Die aufgetragene Pulverschicht wird gemäß den im Vorfeld verarbeiteten geometrischen Schichtdaten belichtet und hierdurch laserstrahlgesintert. Danach wird eine neue Pulverschicht aufgetragen und der Vorgang beginnt von Neuem. Die Genauigkeiten, die mit den am Markt erhältlichen Maschinen erreicht werden können, sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Erzielbare Genauigkeiten innerhalb des Laserstrahlsinterns [30,36]

System-lieferant	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
	x-,y-KG mm	x-,y-WG mm	z-KG mm	z-WG mm	v _M mm/s	b _{sp} mm	h _{sp} mm	KG mm	WG mm
System-lieferant E	+/- 0,01	+/- 0,01	+/- 0,01	n.a.	n.a.	0,3-0,5	0,05-0,3	+/-0,13	+/-0,12
System-lieferant F	0,05	<0,01	0,05	0,05	10-100	0,5-0,8	0,05-0,1	0,1	n.a.
System-lieferant G	0,015	+/- 0,005	0,015	+/- 0,005	n.a.	0,1	Min. 0,025	+/- 0,1	+/- 0,1
System-lieferant H	+/- 0,03	0,002	+/- 0,05	+/-0,05	0-1000	0,15-0,3	>0,05	+/- 0,1	+/- 0,1

Während bei Systemlieferant E die Herstellung von metallischen Bauteilen im zweistufigen Verfahren durch die Verwendung von Stahlpartikeln, die mit einer dünnen Polymerbindemittelschicht umhüllt sind, noch an Nachfolgeverfahren gekoppelt ist (Selective Laser Sintering (SLS)), arbeitet der Systemlieferant F einstufig. Innerhalb des sog. „Direct Metal Laser Sintering Verfahren“ (DMLS) werden zwei Metallpulver angeboten, wobei das eine auf einer Bronzebasis (DirectMetal) aufgebaut ist und das andere aus den Bestandteilen Stahl, Bronze und Nickel (DirectSteel) besteht.[31] Das Prinzip beruht auf der Flüssigphasensinterung, bei der die Vernetzung durch die niedrigschmelzende Komponente des Metallpulvers hervorgerufen wird. Die erreichbaren Dichten liegen je nach gewählten Parametern im Bereich von 85 bis 95 %.[24] Die Systemlieferanten G und H benutzen das Verfahren des selektiven Laserstrahl-

schmelzens, bei dem im Gegensatz zu den o. g. Verfahren eine einkomponentige Metalllegierung vollständig aufgeschmolzen wird. Durch dieses Verfahren entstehen metallische Formkörper mit einer nahezu hundertprozentigen Dichte. Verwendet werden neben unterschiedlichen Stahllegierungen auch Titan- und Aluminiumlegierungen.

2.2.3 Three Dimensional Printing

Beim Verfahren „Three Dimensional Printing“ wird mittels eines Druckknopfes ein flüssiges Bindemittel in ein Pulverbett gespritzt, wodurch eine örtliche Verfestigung des Pulvers hervorgerufen wird. Während die lokale Aufheizung beim direkten Laserstrahlsintern zu starkem Verzug führen kann, tritt dieser Effekt beim 3D-Printing nicht auf. Nach dem Drucken einer Schicht wird die Bauplatzform heruntergefahren, so dass nach erneutem Auftragen einer Pulverlage die nächste Schicht generiert werden kann. Nichtverfestigtes Pulver wirkt hierbei als Stützmaterial für noch nicht verbundene Teile und erlaubt dadurch auch die Fertigung von Überhängen und Hinterschneidungen.[32,33] Im Vergleich mit anderen RP-Maschinen erscheinen die erreichbaren Genauigkeiten beim 3D-Printing insbesondere hinsichtlich der erreichbaren Prozessgenauigkeit als sehr grob (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Erzielbare Genauigkeiten innerhalb des 3D-Printing [32,36]

System- lieferant	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
	x-,y- KG mm	x-,y- WG mm	z- KG mm	z- WG mm	v_M mm/s	b_{Sp} mm	h_{Sp} mm	KG mm	WG mm
System- lieferant I	0,1	0,1	0,01	n.a.	n.a.	0,4	0,1- 0,25	+/- 0,1	+/- 0,1
System- lieferant J	0,05	0,05	0,01	0,010	n.a.	0,1	0,1	+/- 0,1	+/- 0,1

Während beim Systemlieferanten I lediglich Cellulosepulver mit einer gefärbten Flüssigkeit auf Wasserbasis als Binder angeboten wird, arbeitet Anbieter J mit Pulvern auf metallischer Basis. Vertrieben werden von letzterem zwei Pulversorten, bestehend aus unterschiedlichen hochlegierten Stählen, die ebenfalls durch die Aushärtung eines flüssigen Bindemittels verbunden werden. Nach Entnahme weisen die hergestellten Grünlinge Dichten im Bereich von 60 % auf. Ähnlich dem SLS-Verfahren sind Nachbehandlungsverfahren nötig, bei denen im Wesentlichen durch Wärmebehandlung das Polymer entfernt, der bestehende Grünling versintert und im Anschluss daran mit einer Bronzelegierung infiltriert wird.[34]

2.2.4 Laminated Object Manufacturing

Bei diesem Verfahren entsteht der Prototyp durch Aufeinanderkleben einzelner Papierfolien, deren Endkontur durch das schichtweise Ausschneiden mit Hilfe eines Lasers produziert wird. Auf einer in vertikaler Richtung verfahrbaren Trägerplattform werden die einzelnen Folien abgelegt und durch eine beheizte Walze angedrückt. Der Laser verfährt entsprechend den zuvor erzeugten Steuerdaten entlang der Bauteilkontur und schneidet somit die Bauteilgeometrie aus. Eine exakte Fokussierung des Laserstrahls und die Steuerung der Laserleistung gewährleisten, dass jeweils nur die letzte Schicht ausgeschnitten wird. Die nicht zum Werkstück gehörenden Bereiche werden in Rechtecke zerteilt, damit diese später leichter entfernt werden können. Durch das Übereinanderkleben der einzelnen Papierfolien entsteht ein holzähnliches, dreidimensionales Modell.[35,36]

Die mit diesem Verfahren erreichbaren Genauigkeiten liegen aufgrund einer hohen Fertigungsgenauigkeit bei den verwendeten Folien entsprechend hoch und sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Erzielbare Genauigkeiten beim Laminated Object Manufacturing [36]

System-lieferant	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
	x-,y-KG mm	x-,y-WG mm	z-KG mm	z-WG mm	v_M mm/s	b_{Sp} mm	h_{Sp} mm	KG mm	WG mm
System-lieferant K	0,025	n.a.	0,05-0,2	Schicht-dicke	130-200	n.a.	0,05-0,2	+/-0,15	+/-0,05
System-lieferant L	+/-0,025	n.a.	n.a.	0,1	n.a.	n.a.	0,08	+/-0,2	+/-0,025
System-lieferant M	0,01	0,01	0,01	0,01	n.a.	350	0,12	0,15	0,15

Prinzipiell bietet das Verfahren auch die Möglichkeit der Verarbeitung von Metallfolien und Keramikfolien [37,38], die anstelle der Papierfolien eingesetzt werden.

2.2.5 Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling (FDM) bedeutet „Modellierung durch Schmelzauftrag“. Bei diesem Verfahren liegt das Material als Draht aufgewickelt auf einer Rolle und wird mittels Transportrollen in einem elektrisch beheizbaren, in x- und y-Richtung verfahrbaren Düsenkopf transportiert. Das Rohmaterial (Polyamid, Polyethylen, Feinguß- und Maschinenwachs) wird bis knapp unterhalb der Schmelztemperatur erhitzt und trifft im halbflüssigen Zustand auf die Grundplatte bzw. auf die vorangegangene Schicht, erkaltet

beim Kontakt aufgrund der Wärmeleitung und verfestigt sich. Die Vorteile des Prozesses liegen in der breiten Werkstoffpalette und der Tatsache, dass innerhalb eines Modells ein Materialwechsel erfolgen kann, der sich insbesondere bei der Produktion und späteren Entfernung von Stützgeometrien positiv hervorhebt. Die erzielbaren Maschinen- und Prozessgenauigkeiten sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Erzielbare Genauigkeiten beim Fused Deposition Modeling [36]

System-lieferant	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
	x-,y- KG mm	x-,y- WG mm	z- KG mm	z- WG mm	v_M mm/s	b_{Sp} mm	h_{Sp} mm	KG mm	WG mm
System-lieferant N	0,025	n.a.	0,1	0,015	n.a.	0,25- 2,5	0,1-0,7	+/- 0,13	0,025
System-lieferant O	0,006	n.a.	0,003	n.a.	n.a.	n.a.	0,013- 0,13	0,0005 pro inch	n.a.

Basierend auf dem FDM-Verfahren des Systemlieferanten N gibt es verschiedene Ansätze, das Verfahren bezüglich der Verwendung von Metallen und Keramiken weiterzuentwickeln. In diesem Zusammenhang ist insbesondere eine Weiterentwicklung namens „Fused Deposition Ceramics“ zu nennen. Bei dem Verfahren wird das aus dem FDM-Verfahren benutzte Rohmaterial mit unterschiedlichsten Materialien, z. B. verschiedenen Stahlpulvern und unterschiedlichen Keramiken, versetzt und im Anschluss extrudiert. Die Verarbeitung erfolgt in konventionellen FDM-Anlagen. Das Ergebnis ist ein mit dem indirekten Lasersintern vergleichbares Produkt, welches mit den beim Sintern eingesetzten Nachfolgeprozessen zu einem metallischen oder keramischen Prototyp weiterverarbeitet werden kann.[39,40,41] Das Verfahren wurde derartig weiterentwickelt, dass innerhalb einer Lage vier verschiedene Werkstoffe verarbeitet werden können, wodurch das Verfahren (Fused Deposition of Multiple Ceramics (FDMC)) insbesondere für Bauteile aus dem Elektronikbereich und dem elektromechanischen Bereich interessant wird.[42,43]

2.2.6 3D-Laserstrahlaufragschweißen

In Anlehnung an das Laserstrahlaufragschweißen handelt es sich bei diesem Verfahren um ein formgebendes Auftragschweißen, welches im Gegensatz zum direkten Laserstrahlsintern mit dem völligen Eintritt des Zusatzwerkstoffes in die schmelzflüssige Phase arbeitet. Der Zusatzwerkstoff wird in pulverförmigem Zustand im einstufigen Verfahren, d. h. ohne Vordeponierung, zugeführt und durch den Laserstrahl aufgeschmolzen. Infolge der Wärmeleitung in das Bauteil erfolgt die Erstarrung der Schmelze. Herausragender

Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich damit alle Materialien verarbeiten lassen, die in pulverförmiger Form erhältlich sind und sich in den schmelzflüssigen Zustand überführen lassen. Mit diesem Verfahren erreichbare Genauigkeiten stehen in direktem Zusammenhang mit der Qualität der verwendeten Laserstrahlquellen und der verwendeten Pulverfraktionen, die erreichbaren Dichten liegen bei nahezu 100 %. Da das 3D-Laserstrahlaufragschweißen als eine Art Weiterentwicklung des in der Literatur hinreichend beschriebenen Laserstrahlbeschichtens von Bauteiloberflächen verstanden werden kann, können viele Erkenntnisse, die beim Beschichten gewonnen worden sind, auf das Verfahren übertragen werden. Die innerhalb der am Markt erhältlichen Maschinen- und Prozessgenauigkeiten sind in der Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Erzielbare Genauigkeiten beim 3D-Laserstrahlaufragschweißen [44,45,46]

System- lieferant	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
	x-,y- KG mm	x-,y- WG mm	z- KG mm	z- WG mm	v_M mm/s	b_{Sp} mm	h_{Sp} mm	KG mm	WG mm
System- lieferant P	0,051	n.a.	0,51	n.a.	n.a.	0,7-2,5	0,25- 1,2	0,51	n.a.
System- lieferant Q	0,05	n.a.	0,1	n.a.	n.a.	0,6-2,8	0,3-1,4	+/- 0,127	n.a.

Kommerzialisiert wurde das Verfahrensprinzip systemlieferantenabhängig zum einen unter dem Handelsnamen LENS (Laser Engineered Net Shaping, Systemlieferant P), zum anderen mit der Bezeichnung DMD (Direct Metal Deposition, Systemlieferant Q). Beim LENS-Verfahren wird Metallpulver in ein durch einen Nd:YAG-Laserstrahl erzeugtes Schmelzbad injiziert. Zur Vermeidung von Oxidationen erfolgt der Prozess in einer Niederdruck-Argonkammer, in der sich eine in x- und y-Richtung verfahrbare Plattform zur Generierung des Bauteils befindet. Nach dem Aufbau einer Schicht des Bauteils verfährt die Pulverdüse für die Generierung der nächsten Schicht nach oben. Unterschiede innerhalb der Verfahrensprinzipien liegen lediglich in der Auswahl der verwendeten Laserstrahlquelle.

Der herausragende Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, metallische Bauteile direkt im einstufigen Verfahren zu erzeugen, ohne auf entsprechende Nachfolgeprozesse wie z. B. Nachsintern, Entfernung von Bindermaterialien und Infiltrationsprozessen zurückgreifen zu müssen. Es wurden bereits Teile aus rostfreiem Stahl und Werkzeugstahl, aus Nickel-Superlegierungen (Inconel 625, 690 und 718), sowie aus Wolfram- und Titanlegierungen hergestellt.

2.3 Entwicklungen innerhalb der Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik (MST) ist eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Die heutigen Anwendungen, so bedeutend sie auch sein mögen, stellen erst den Anfang einer Entwicklung dar, deren Höhepunkte auf mittlere Sicht zu erwarten sind und deren Erschließung völlig neuer, heute nur ansatzweise erkennbarer Einsatzgebiete noch aussteht.[3] In diesem Zusammenhang verwundert es nicht, dass eine Studie, die Ende 1999 von NEXUS (The Network of Excellence on Multifunctional Microsystems) herausgegeben worden ist, dem Weltmarkt für MST-Produkte im Zeitraum von 2000 bis 2005 ein durchschnittliches Wachstum von fast 20 % vorausgesagt hat [47,48], welches in der Abbildung 2 grafisch dargestellt ist.

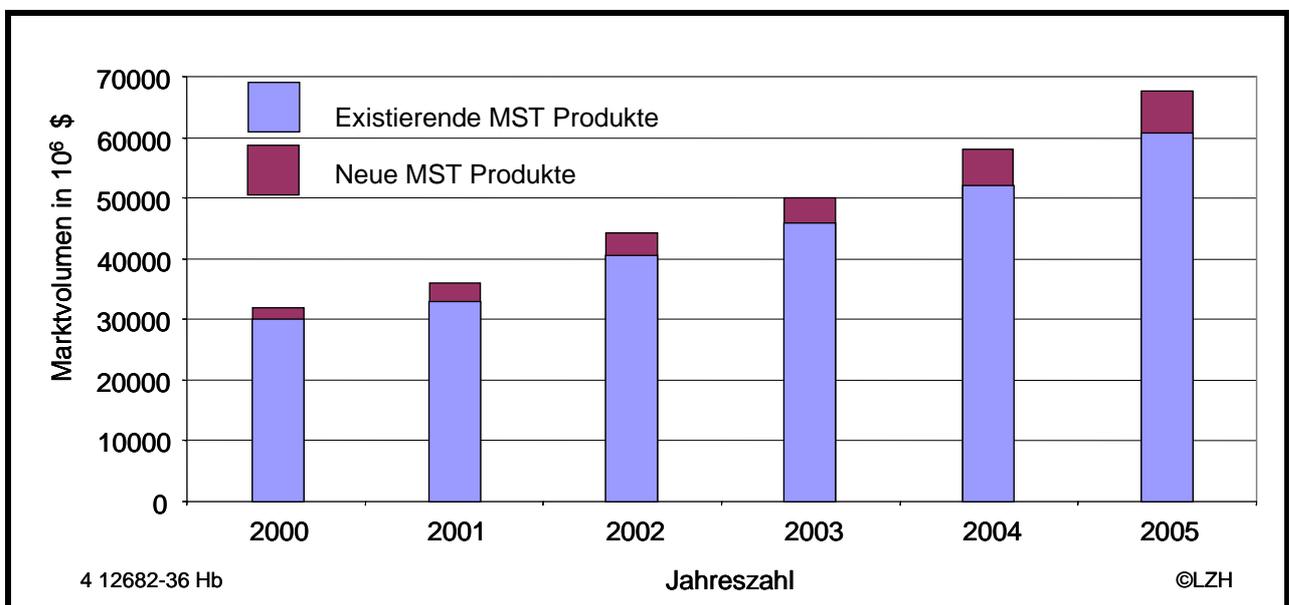


Abbildung 2: Weltmarktvolumen für Mikrosystemtechnikprodukte [48]

Die Hauptanwendungsgebiete für Produkte der Mikrosystemtechnik liegen im IT-Bereich und innerhalb von biomedizinischen Anwendungen. Weitere Anwendungsfelder befinden sich im Automobilbereich, in der Hausgerätektechnik und in der Telekommunikation. In der Abbildung 3 ist der tatsächliche Gesamtumsatz im Jahr 2000 dem prognostizierten Gesamtumsatz von 2005 gegenübergestellt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich die Nachfrage nach Produkten der Mikrosystemtechnik in allen Bereichen bis zum Jahr 2005 mehr als verdoppeln wird.

Mikrosysteme werden dadurch ermöglicht, dass Mikrotechniken funktional und miniaturisiert im Aufbau kombiniert werden, so z. B. Schichttechniken aus der Elektronik, integrierte Optiken oder Mikromechanik. Zusammengefügt werden die einzelnen Komponenten durch Aufbau- und Verbindungstechniken. Die Mikrosystemtechnik ist

demnach die funktionale Verknüpfung einzelner Mikrotechniken unter Anwendung der Systemtechniken zu Einheiten.

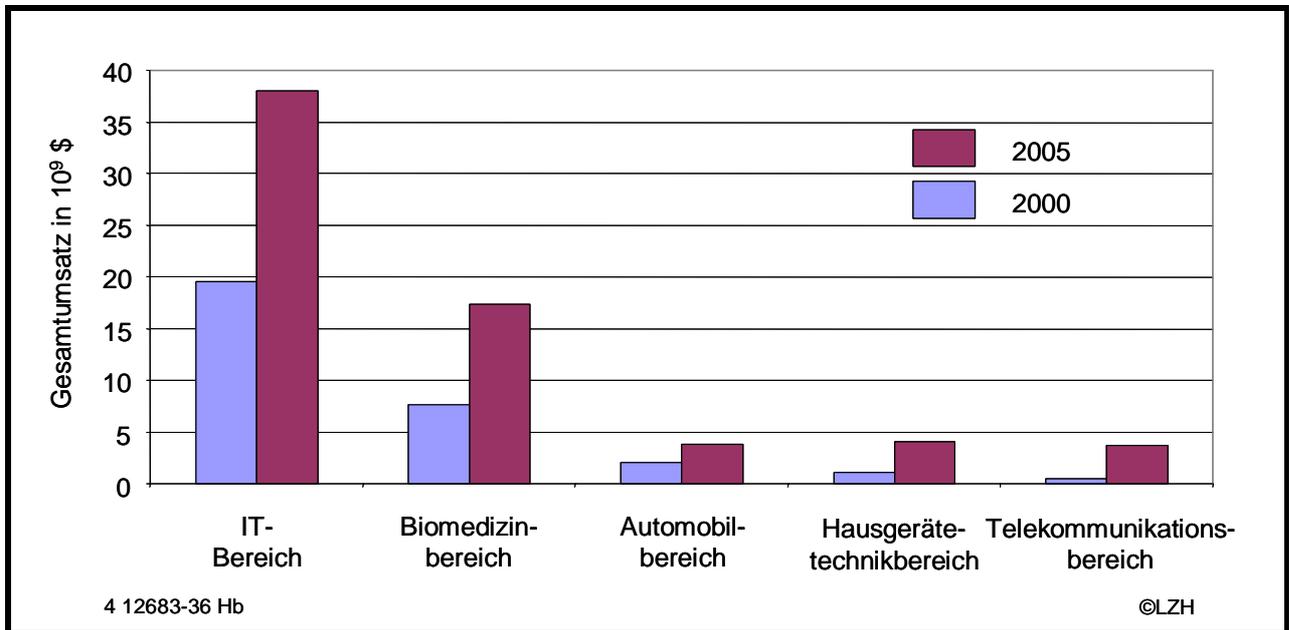


Abbildung 3: Hauptanwendungsfelder innerhalb der Mikrosystemtechnik Produkte [48]

Die Mikrotechniken schaffen hierbei die technologischen Voraussetzungen für die Miniaturisierung und Systemfähigkeit der einzelnen Funktionen bzw. Komponenten des Mikrosystems. Die Mehrzahl der Mikrotechniken hat ihren Ursprung in Technologien der Mikroelektronik oder der konventionellen Sensorik/Aktorik, die entsprechend der individuellen Anforderungen weiterentwickelt worden sind. Mikromechanische Bauelemente im Mikrometermaßstab erfüllen innerhalb der Mikrosystemtechnik die unterschiedlichsten Aufgaben und lassen sich u. a. als konstruktive Elemente (z. B. Klammern, Biegeplatten, Einbettstrukturen) für den Aufbau von Mikrosystemen, miniaturisierten Sensorfunktionselementen (z. B. Drucksensorenmembranen) oder auch als miniaturisierte Aktorelemente (Mikrozahnräder, Mikrozangen, Mikrogelenke, Mikropumpen) einsetzen. Diese Mikrobauteile bilden zugleich eine wichtige Voraussetzung zum Aufbau von komplexeren Mikrosystemen wie Mikromaschinen. Beispielhaft sind in Abbildung 4 zwei exemplarische Mikrosysteme dargestellt. Der linke Teil der Abbildung zeigt eine Mikroturbine mit einem Rotordurchmesser von 250 µm mit angekoppelter Glasfaser zur Drehzahlmessung, im rechten Teil ist ein Mikroschalter abgebildet.

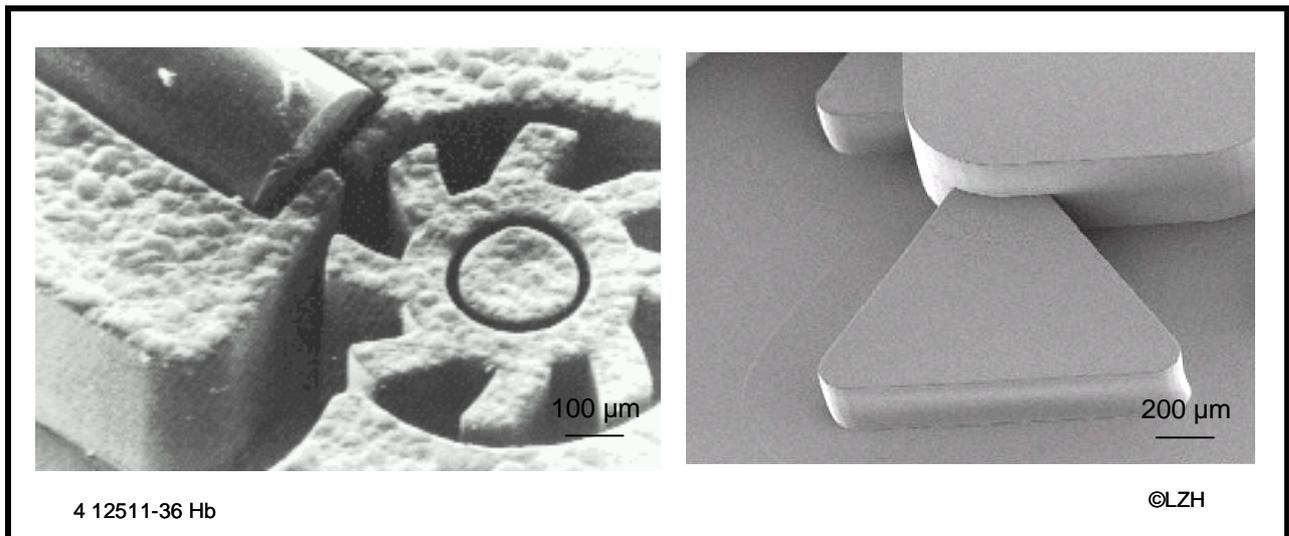


Abbildung 4: Mikrosysteme [47]

Ausgehend von lithografischen Verfahren zur Strukturübertragung lässt sich die dreidimensionale Formgebung mit unterschiedlichen mikromechanischen Prozessen erreichen, wie z. B. durch anisotropes Ätzen von Silizium, Mikrogalvanikprozesse, Laserprozesse oder mit der sich noch in der Grundlagenforschung befindlichen Ion Track Technology (ITT).

Mit dem LIGA-Verfahren, einer äußerst zeitintensiven Kombination aus Lithografie, Galvanoformung und Abformung, lassen sich bereits jetzt komplexe dreidimensionale Mikrostrukturkörper mit hohem Aspektverhältnis aus einer breiten Palette von Materialien realisieren. Bei den eingesetzten Materialien dominiert aus Verfügbarkeitsgründen eindeutig das Silizium, wobei die Herstellung von metallischen Bauteilen zunehmend für die Mikrosystemtechnik an Bedeutung gewinnt.

Insbesondere durch die Weiterentwicklung „konventioneller“ feinwerktechnischer Bearbeitungsmethoden lassen sich komplexe dreidimensionale Mikrostrukturen in Materialien erzeugen, die für etablierte Mikrotechnologien nicht zugänglich sind, wie dies z. B. für Edelstahl, Hartmetall und Titan der Fall ist. So erlauben neuere Methoden der spanabhebenden Bearbeitung meist metallischer Oberflächen Strukturhöhen bis zu einem Millimeter bei einer Strukturgenauigkeit von etwa ein bis zwei Mikrometern und Rauheitswerten R_a im Bereich von 10 Nanometern. Das Verfahren erweist sich in vielen Fällen aus Kostengründen für eine direkte Produktfertigung als weniger geeignet und wird daher vielmehr für die Herstellung von Abformwerkzeugen für Heißpräge- und Spritzgussverfahren benutzt.

Als eine ebenfalls sehr kostenintensive und zeitaufwendige Herstellungsmethode bieten funkenerosive Verfahren (Draht- und Senkerodiertechiken) inzwischen beste Möglich-

keiten zur präzisen, dreidimensionalen Erzeugung von elektrisch leitfähigen Materialien. Mit diesem Verfahren sind Strukturgrößen von 10 Mikrometern bei einer Formgenauigkeit von einem Mikrometer erreichbar.

Bestrebungen, Rapid Prototyping Verfahren auch innerhalb der Mikro- und Mikrosystemtechnik mit Strukturgrößen im Bereich von 1 bis 100 Mikrometern nutzen zu können, um damit letztlich auch die kostenintensive Umformtechnik durch die LIGA-Technik zu umgehen, führten zu verschiedenen Weiterentwicklungen innerhalb der o. g. Verfahren. Ziele dieser Weiterentwicklungen liegen insbesondere in einer Erhöhung der Strukturgenauigkeit in den unteren zweistelligen Mikrometerbereich und der Erschließung einer größeren Werkstoffpalette.[49,50] Die wesentlichen dieser Weiterentwicklungen werden im Folgenden vorgestellt.

2.3.1 Mikrophotoverfestigung mittels LCD-Maskentechnik (MPL)

Basierend auf dem Stereolithografie-Verfahren nutzt das MPL-Verfahren eine Transmissions-Flüssigkristallanzeige (LCD) als Belichtungsmaske zur Erzeugung der einzelnen Belichtungsmuster. Das Verfahren eignet sich sehr gut zur Herstellung von Bauteilen, deren Abmessungen im Zentimeterbereich liegen und deren kleinste laterale Strukturabmessungen 0,01 mm betragen. Der wesentliche Vorteil des MPL-Prinzips liegt im Vergleich zu bestehenden Stereolithographiesystemen in dem einfachen Aufbau und der damit verbundenen Reduzierung der Herstellungskosten. Beim MPL-Verfahren erzeugt eine geeignete Lichtquelle die für die Polymerisation benötigte Strahlung. Unter Verwendung einer geeigneten Projektionsoptik erfolgt die homogene Ausleuchtung des LC-Displays. Das LC-Display wird von einem PC angesteuert und zeigt das Muster des Querschnitts der zu belichtenden Schicht. Unter Zuhilfenahme einer Optik erfolgt die Abbildung des Musters in verkleinertem Maßstab auf der Oberfläche des Photopolymers. Die Herstellung von dreidimensionalen Schichten wird ähnlich wie bei konventionellen Stereolithografieanlagen durch eine zu integrierende Absenkeinrichtung erreicht.[51] Der spektrale Empfindlichkeitsschwerpunkt liegt bei einer Wellenlänge von 470 nm, die Auflösung des Systems beträgt 25 μm bei einer maximalen Bauteilgröße von $(20 \times 15 \times 20) \text{ mm}^3$ ($b_B \times h_B \times t_B$).[52] Aufgrund von fehlenden Literaturangaben hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeiten bei diesem Verfahren muss auf eine Angabe in Tabellenform verzichtet werden. In der Abbildung 5 ist das Prinzip des MPL-Verfahrens dargestellt. [53]

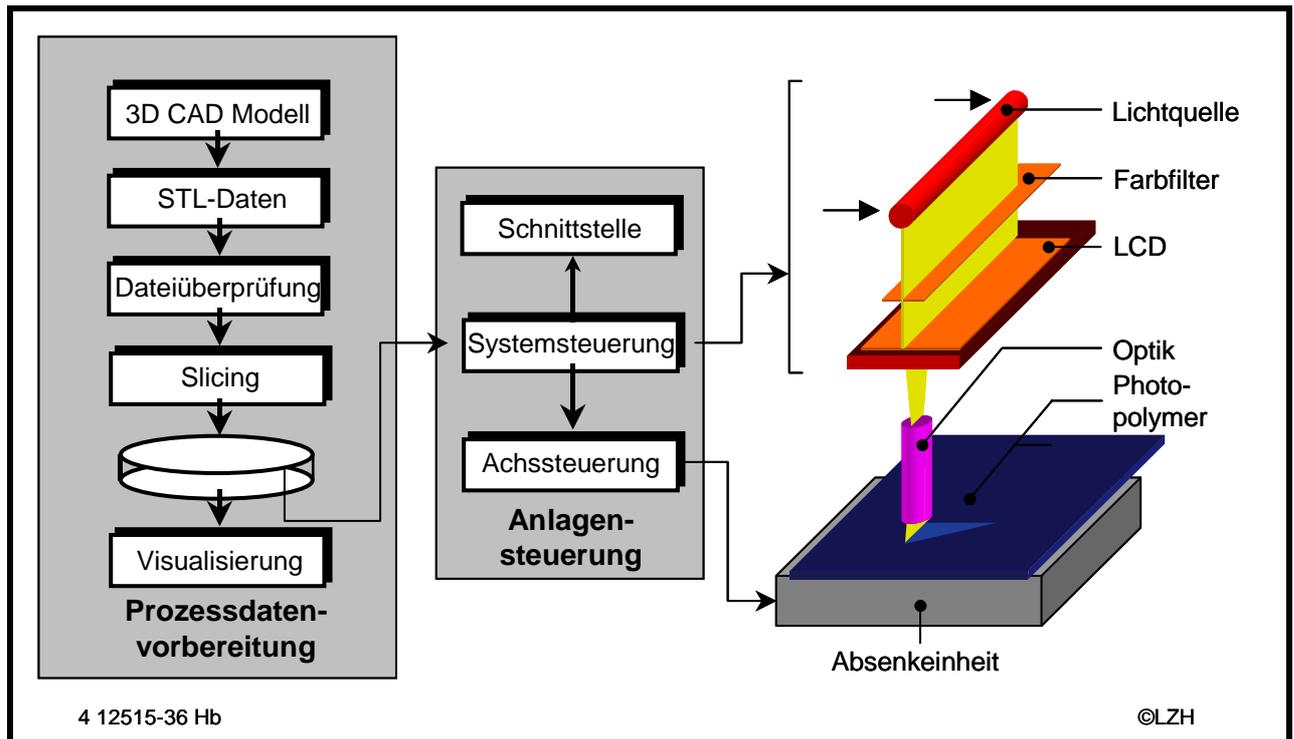


Abbildung 5: Verfahrensprinzip des MPL-Verfahrens

2.3.2 Rapid Micro Product Development (RMPD)

Als eine Mikro-Variante der bereits in vorherigen Abschnitten angesprochenen Stereolithografie ist das sog. RMPD-Verfahren zu verstehen. Das Besondere an diesem Verfahren, welches ebenfalls auf der schichtweisen Aushärtung eines Flüssigpolymers durch Laserstrahlung basiert, sind die erreichbaren Auflösungen der Bauteile, die mit Wachstumsschritten unterhalb von einem Mikrometer angegeben sind. Die verwendeten Werkstoffe sind Acrylate und Epoxide.[54,55,56,57,58] In der Abbildung 6 sind exemplarisch zwei mit dem RMPD-Verfahren hergestellte Bauteile abgebildet.

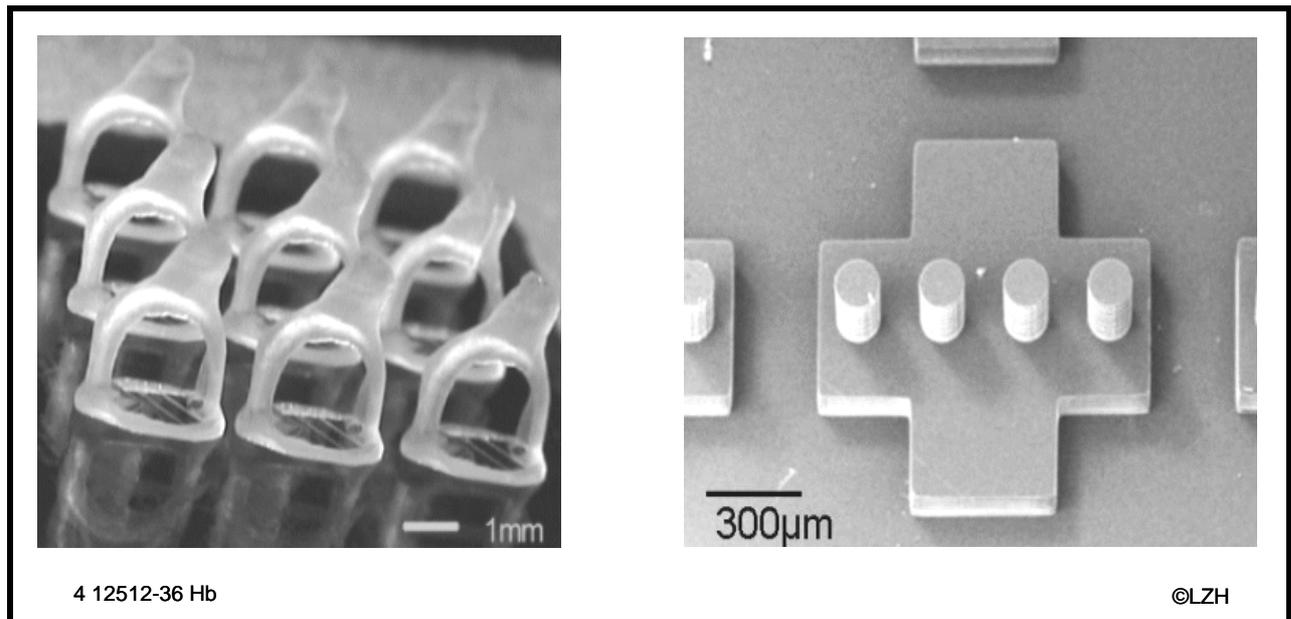


Abbildung 6: Mit dem RPMD-Verfahren hergestellte Bauteile [59]

Erreicht werden die geringen Wachstumsschritte durch die Verwendung von zwei parallelen Quarzglasplatten, zwischen denen der flüssige Reaktionsstoff deponiert wird. Aufgrund der Oberflächenspannung des Klebers und der auftretenden Adhäsionskräfte, hervorgerufen durch die externe Anziehung zwischen der Flüssigkeit und den Quarzglasplatten, wird erreicht, dass die Flüssigkeit als zusammenhängender Verband zwischen den Platten als eine Art Flüssigkeitssäule bestehen kann (vgl. Abbildung 7). Durch einen Mechanismus, mit dem der Abstand der Platten mit der angegebenen Auflösung variiert werden kann, ist es möglich, die Flüssigkeitssäule ohne ein Abreißen derselben zu heben und hierdurch das Nachströmen weiterer Flüssigkeit zur Generierung folgender Schichten zu bewirken. Neben der Einzelteilerfertigung wird auch die Herstellung von Kleinserien angeboten. Ein weiteres Verfahren, das mit verstellbaren Linsen arbeitet, wird für größere Bauteile mit feinen Details verwendet.[60]

Andere zur Zeit wissenschaftlich verfolgte Ansätze zielen auf den Einsatz von Laserstrahlquellen mit im Vergleich zum beschriebenen Verfahren höheren Strahlqualitäten ab. Hierdurch wird eine bessere Fokussierung des Laserstrahls erreicht, welche wiederum zu noch kleineren Auflösungen innerhalb der erzeugten Strukturen führen soll.[61,62] Das Verfahrensprinzip des RMPD-Verfahrens ist in der Abbildung 7 verdeutlicht.

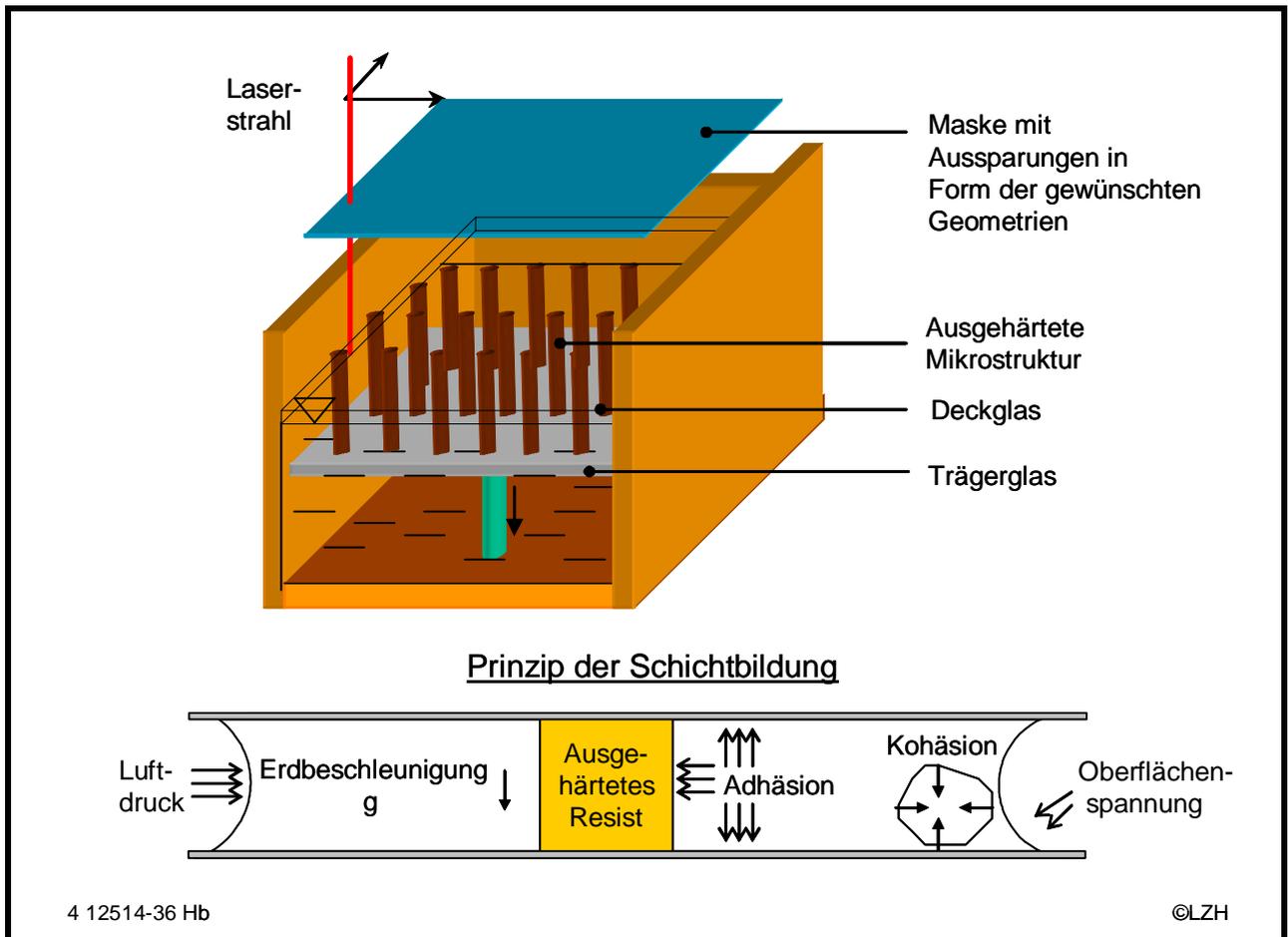


Abbildung 7: Verfahrensprinzip des RMPD-Verfahrens

Durch diese generative Fertigungsweise lassen sich Bauteilgeometrien mit Auflösungen erzeugen, wie sie mit keinem der bisher auf den Markt gebrachten Systeme erreicht wurden. Trotz der hohen erreichbaren geometrischen Auflösung ist der Einsatz solcher Bauteile als Funktionsprototypen jedoch nach wie vor stark eingegrenzt, da erst die im Vergleich mit direkten Verfahren sehr aufwendige Kombination der Mikro-Stereolithografie mit den Verfahren des Niederdruckspritzgusses zur Herstellung von metallischen Bauteilen führt.[63]

Tabelle 7: Erzielbare Genauigkeiten beim RMPD-Verfahren [64]

System-lieferant	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
	x-,y- KG mm	x-,y- WG mm	z- KG mm	z- WG mm	v_M mm/s	b_{Sp} mm	h_{Sp} mm	KG mm	WG mm
System-lieferant R	0,001	0,001	0,001	0,001	n.a.	0,001	0,001	+/- 0,001	+/- 0,001

Die erreichbaren Genauigkeiten innerhalb des RMPD-Verfahrens liegen nach Herstellerangaben sowohl bei der Maschine als auch beim Prozess mit jeweils einem Mikrometer außerordentlich hoch (vgl. Tabelle 7).

2.3.3 Laserstrahlmikrosintern (LSMS)

Im Mittelpunkt aktueller Forschungsarbeiten im Bereich einer Miniaturisierung des Verfahrens Laserstrahlsintern steht ebenfalls die Reduzierung der herstellbaren Bauteilauflösungen. Ansätze hierzu konzentrieren sich insbesondere auf eine Reduzierung der Laserstrahlabmessungen, die mit höheren Bauteilauflösungen einhergeht sowie positive Auswirkungen hinsichtlich der Partikelkörnung und -zufuhr hat. Die unterschiedlichen Ansätze werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Um einen möglichst geringen Fokusbereich zu erzielen, arbeiten Chen et al. mit einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser [65]. Bei einer Ausgangsleistung von 10 W wird ein Fokusbereich von 15 μm erreicht. Mit einem Bleipulver wird ein Bauteil mit einer Wandstärke von 0,1 mm bei einer Höhe von 2 mm generiert.

Auch Arbeiten von Leclerc et al. konzentrieren sich auf die Steigerung der Präzision des Lasersinterprozesses [66]. Mit einem hochfokussierten Nd:YAG-Laserstrahl erzielen sie einen Strahldurchmesser von etwa 10 μm . Weiterhin wird an der Genauigkeit der Strahlpositionierung sowie an der Vermeidung von Wiederholungsfehlern gearbeitet. Damit kann die Oberflächenrauigkeit entscheidend vermindert werden.

Vergleiche zum Lasermikrosintern von Ein-Komponenten- und Zwei-Komponenten-Pulvern werden von Kathuria vorgestellt [67,68,69]. Mit Ni-Pulver betragen die erzielten Wandstärken 221 μm bei einer Wandhöhe von ca. 2 mm. Verwendet wird ein Nd:YAG-Laser. Bei der Verarbeitung von Cu-Si-Pulver sind die resultierenden Wandstärken deutlich größer (470 μm).

Einen kombinierten Mikrosinter-/Mikrostrukturier-Prozess haben Li et al. entwickelt [70]. Unter Verwendung eines frequenzvervielfachten Nd:YAG-Lasers und eines speziellen Ultraschall-Pulverdosierungsmechanismus werden dreidimensionale Mikrobauteile aus Edelpulver (Korndurchmesser: ca. 3 μm) mit Wandstärken von etwa 100 μm hergestellt.

Weitere Arbeiten zur ultraschallunterstützten Pulverzufuhr werden von Matsusaka et al. durchgeführt [71,72]. Kapillarrohre mit einem Innendurchmesser von 0,5 mm werden für den Transport von Aluminiumpulver untersucht. Mit einer Ultraschallfrequenz von 20 kHz lassen sich Fördermengen von einigen Milligramm pro Sekunde erzielen.

Arbeiten zum Einsatz von nanoskaligen Pulvern beim LSMS sind Bestandteil aktueller Untersuchungen [73,74,75]. Durch die Bearbeitung in einer Vakuumkammer und den Einsatz eines Nd:YAG-Lasers mit einem Fokusbereich von $15\ \mu\text{m}$ können Schichtdicken von $< 5\ \mu\text{m}$ bei einer Auflösung $< 30\ \mu\text{m}$ aus einzelnen Metallpulvern erzeugt werden.

Neben den dargestellten Varianten ist eine neuartige Verfahrenstechnik zum Laserstrahlmikrosintern entwickelt worden, die sich hinsichtlich des Pulverauftragmechanismus wesentlich von den vorgestellten Entwicklungen unterscheidet. Anstelle des üblicherweise verwendeten Schiebersystems zur Vordeponierung des Zusatzwerkstoffes kommt ein Rollensystem zum Einsatz (vgl. Abbildung 8). Vorteil dieses Verfahrens ist eine definierte Vorkomprimierung der aufgetragenen Schichten, die im Vergleich zur konventionellen Methode nach dem Versintern durch Laserstrahlbeaufschlagung zu dichteren Formkörpern führt. [76]

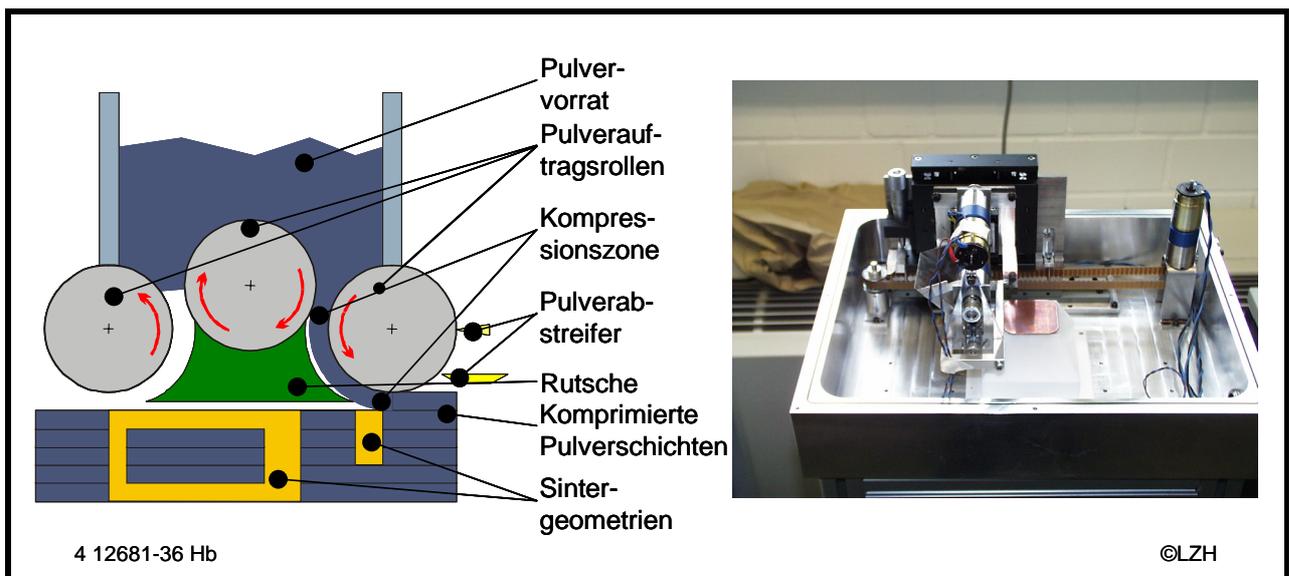


Abbildung 8: Entwickelter Auftragmechanismus beim Laserstrahlmikrosintern am Laser Zentrum Hannover e.V.

Die Maschinengenauigkeiten liegen hierbei im Bereich von einem Mikrometer hinsichtlich der z-Achse und einer Konturgenauigkeit des Scannersystems im Mikrometerbereich. Die Prozessgenauigkeiten liegen in einer minimal erreichbaren Bahnbreite von $20\ \mu\text{m}$ und einer einstellbaren Schichtdicke im Bereich von 10 bis $50\ \mu\text{m}$ (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Erreichbare Genauigkeiten beim Laserstrahlmikrosintern [77]

	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
System-lieferant	x-,y- KG mm	x-,y- WG mm	Z- KG mm	Z- WG mm	v_M mm/s	b_{Sp} mm	h_{Sp} mm	KG mm	WG mm
System-lieferant S	0,005	0,005	0,001	0,001	2-4000	Min. 0,05	0,01- 0,025	+/- 0,01	+/- 0,01

2.3.4 Liquid Metal Jet Printing (LMJP)

Zur direkten Herstellung von metallischen Bauteilen ist das sog. „Liquid Metal Jet Printing Verfahren“ entwickelt worden, dessen Verfahrensprinzip in der Abbildung 9 verdeutlicht ist. Bei diesem Verfahren wird eine niedrigschmelzende Metalllegierung (Bi-Pb-Sn-Cd-In-Leg.) in einer elektrisch beheizbaren Kammer geschmolzen.

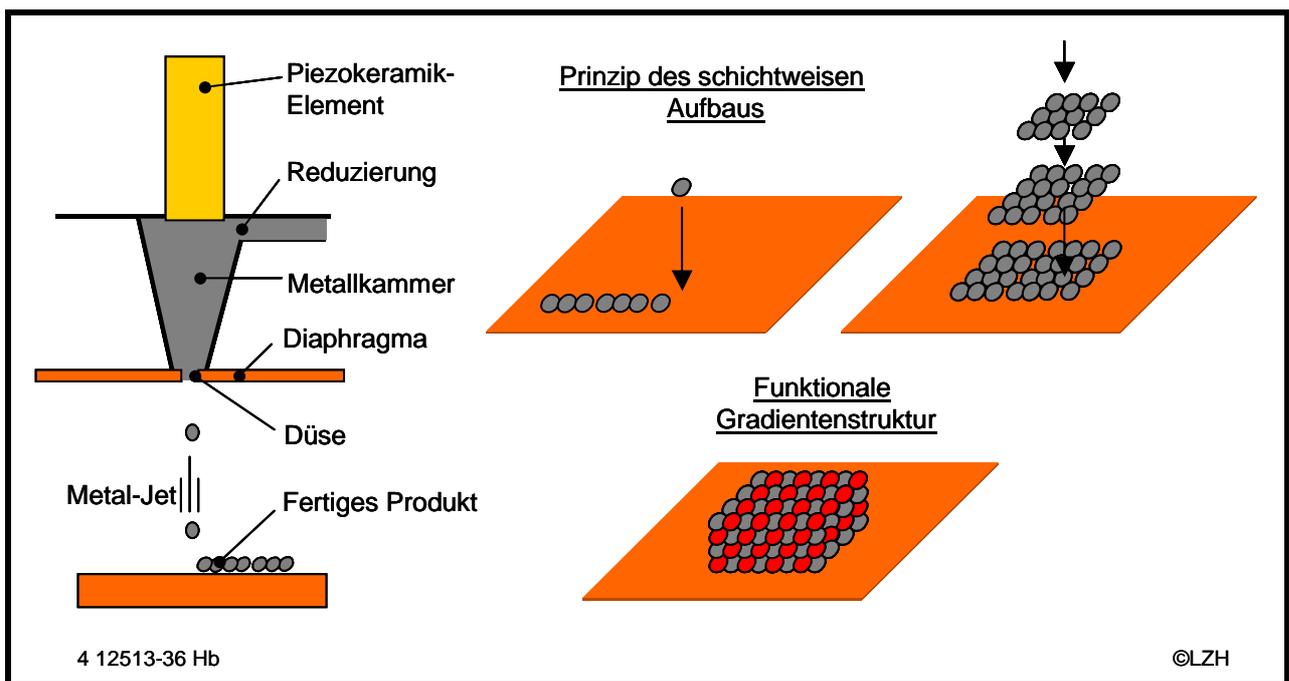


Abbildung 9: Verfahrensprinzip des LMJP-Verfahrens

Die Kammer ist auf der oberen Seite durch eine Membran verschlossen und an der gegenüberliegenden Seite befindet sich der Austritt in Form einer Düse. An der Membran ist ein Piezoelement angebracht, welches bei entsprechender Anregung das Volumen innerhalb der Kammer verändert und im Fall einer Volumenvergrößerung flüssiges Metall aus der Kammer auf ein Substrat befördert. Durch die Variation des Düsendurchmessers während des Prozesses können mit diesem Verfahren Tropfendurchmesser im Bereich von 100 bis 1000 μm erzeugt werden. Durch die Kombination des Verfahrens mit einer

entsprechenden Handhabungstechnik kann die gesamte Prozesskette des Rapid Prototyping von der Aufbereitung der 3D-Daten bis hin zur Generierung integriert werden.[78] Die erzielbaren Genauigkeiten des Verfahrens liegen im Bereich von 0,1 mm und sind in der Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Erzielbare Genauigkeiten beim LMJP-Verfahren

	Maschinengenauigkeit					Prozessgenauigkeit			
System- lieferant	x-,y- KG mm	x-,y- WG mm	z- KG mm	z- WG mm	v_M mm/s	b_{Sp} mm	h_{Sp} mm	KG mm	WG mm
System- lieferant T	0,1	n.a.	0,1	n.a.	n.a.	0,1	0,1	n.a.	n.a.

3 Zielsetzung der Arbeit

Die Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik zeigt, dass es momentan keine Technologie gibt, mit der im direkten Verfahren metallische Werkstoffe generativ zu Mikrobauteilen verarbeitet werden können. Die Defizite innerhalb der vorgestellten Verfahren liegen neben den limitierten erreichbaren Strukturdimensionen besonders in den zeit- und kostenintensiven Nachbearbeitungsverfahren. Miniaturisierungsansätze bewährter generativer Verfahren führen zwar zu höheren erreichbaren Auflösungen, können dem Anspruch zur Herstellung von metallischen Miniaturbauteilen jedoch auch nur durch Kombination mit den Verfahren des Niederdruckspritzgusses gerecht werden.

Zielsetzung dieser Arbeit ist daher, einen Beitrag zur Entwicklung einer lasergestützten Verfahrenstechnologie zur direkten Herstellung von metallischen Mikrostrukturen und Mikrobauteilen mit Auflösungen im unteren Mikrometerbereich zu leisten. Hierdurch wird den Marktentwicklungen innerhalb der Mikro- und Mikrosystemtechnik hinsichtlich kürzer werdender Produktentwicklungszyklen in Verbindung mit einer angespannten Wettbewerbssituation Rechnung getragen. So wäre es möglich, die im Vergleich zu indirekten Verfahren anfallenden Kosten und Bearbeitungszeiten für Folgetechnologien zur Herstellung von metallischen Bauteilen zu minimieren.

Um das angestrebte Ziel erreichen zu können, ist zunächst das aussichtsreichste Verfahren auszuwählen. Zu diesem Zweck werden die Möglichkeiten der am Markt erhältlichen kommerziellen Systeme mit den zur Zeit erreichbaren Genauigkeiten und dem Potential zur direkten Fertigung von metallischen Bauteilen ausführlich vorgestellt. Dabei wird deutlich, dass innerhalb der generativen Verfahren lediglich das 3D-Laserstrahl-auftragschweißen zur einstufigen Generierung von kompakten rein metallischen Funktionsprototypen geeignet ist und durch entsprechende Anpassung der verwendeten Systemkomponenten alle Möglichkeiten zur Herstellung von miniaturisierten Funktionsbauteilen besitzt.

Im Hinblick auf die geplante Miniaturisierung des makroskopischen 3D-Laserstrahl-auftragschweißens muss zunächst die Technologie desselben ausführlich dargestellt werden, wobei sowohl das Verfahrensprinzip als auch die zum Prozessverständnis notwendigen Grundlagen problembezogen zu betrachten sind. Hierdurch sind bereits im Vorfeld mögliche Engpässe und Verfahrensschwierigkeiten aufzudecken und zu kompensieren. Die hierbei gesammelten Erkenntnisse sind mit in die Anlagenkonzeptionierung zu integrieren.

Basierend auf den Ausführungen zur Technologie und den bei der Übertragung auf eine Mikroverfahrensvariante möglichen Verfahrensproblemstellungen erfolgt die Entwicklung

der Versuchsanlage zum Schweißen metallischer Mikrostrukturen. Schwerpunkte werden hierbei die begründete Auswahl und Anpassung bzw. Neukonzeptionierung von Anlagenkomponenten sowie deren Integration in ein Maschinenkonzept sein. Nach dem eigentlichen Aufbau sind die Inbetriebnahme und umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich Charakterisierung und Qualifizierung von Strahleigenschaften und Systemzuständen durchzuführen.

In einem experimentellen Teil werden Schweißversuche erfolgen, die das Potential der Anlage hinsichtlich der Erzeugung von Geometrien und deren minimal erreichbaren Auflösungen aufzeigen sowie mögliches vorhandenes Verbesserungspotential aufdecken sollen.

Neben prozesstechnischen Optimierungen sind unter Nutzung des hierzu zu erarbeitenden Wissensstandes grundlegende Möglichkeiten einer prozessangepassten Zusatzwerkstoffzufuhr zu entwickeln und zu diskutieren. Die theoretischen Betrachtungen sind durch Modellbildung und umfangreiche Simulationsarbeiten zu begleiten.

Auftragschweißprozesses wird die Vielzahl der wesentlichen Einflussgrößen in sinnvolle Hauptfaktoren unterteilt und in Form eines Ishikawa-Diagramms strukturiert dargestellt. Aus der Vielzahl der Einflussgrößen werden wiederum wesentliche, im weiteren Verlauf der Arbeit zu beleuchtende Parameter und deren Zusammenhänge gesondert dargestellt. Zu weiteren wichtigen Zusammenhängen, wie z. B. der Strahl-Stoff-Wechselwirkung, wird insbesondere hinsichtlich des Transmissionsgrades Stellung bezogen. Basierend auf den in diesem Abschnitt erläuterten Zusammenhängen werden die bei der Anlagenkonzeptionierung einer Mikroverfahrensvariante zu erwartenden Besonderheiten erläutert.

Im Anschluss daran werden die Entwicklung und der Aufbau der Prozesstechnik durchgeführt sowie die wesentlichen Anlagenkomponenten der Strahlerzeugung, -führung und -formung, der Partikeltransport und die Partikelfokussierung sowie wichtige Pheripheriekomponenten charakterisiert. Im Rahmen der Inbetriebnahme der Versuchsanlage werden die möglichen Betriebszustände messtechnisch erfasst und im Besonderen auf Reproduzierbarkeit überprüft. Schwerpunkte bilden hierbei die Vermessung des Laserstrahls, Untersuchungen zur Förderbarkeit der Mikropartikel unter Zuhilfenahme der Hochgeschwindigkeitskameratechnik, sowie Untersuchungen zur Gewährleistung einer definierten Schutzgasatmosphäre.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werden zunächst an Einzelbahnen die grundlegenden Abhängigkeiten des Verfahrens untersucht, wobei neben der äußeren Schweißnahtbewertung die Auswertung von Querschliffaufnahmen hinsichtlich geometrischer Grenzen einen wesentlichen Schwerpunkt darstellt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden mit den Erkenntnissen der Prozessbeobachtung korreliert und zusammen mit den Schweißnahteigenschaften der Prozessanalyse zugeführt.

Aufgrund der zu erwartenden Defizite hinsichtlich der Zusatzwerkstoffzufuhr werden Ansätze erarbeitet, die eine dem Verfahren angepasste Pulverbereitstellung erlauben. Hierzu werden diese Defizite zunächst aufgezeigt und anhand des Standes der Wissenschaft und Technik mögliche Prinzipien zur Pulverfokussierung erläutert sowie hinsichtlich der Möglichkeiten einer Integration abgeschätzt. Im Anschluss hieran wird das ausgewählte Verfahren durch umfangreiche Simulationsarbeiten qualifiziert und die Ergebnisse wiederum der Prozessanalyse zugeführt. Als Resultat liegt ein tiefgreifendes Prozessverständnis insbesondere der partikelgrößenabhängigen Strahl-Stoff-Wechselwirkung und der Partikelfokussierung vor.

5 Technologie des 3D-Laserstrahlaufragschweißens

5.1 Verfahrensprinzip des 3D-Laserstrahlaufragschweißens

Die Prozessmerkmale des 3D-Laserstrahlaufragschweißens basieren im Wesentlichen auf dem einlagigen Beschichten mit Laserstrahlung, welches hauptsächlich der Kompensierung von Verschleißstellen bzw. der Herstellung von Funktionsflächen durch das Aufbringen einer Spur (eindimensional) bzw. einer Fläche (zweidimensional) auf einem Grundwerkstoff (Substrat) dient. Der Laserstrahl dient hierbei als Energiequelle zum Aufschmelzen eines im einstufigen Prozess zugeführten meist pulverförmigen Zusatzwerkstoffes, welcher auf einem Substrat abgeschieden wird. Die Zusatzwerkstoffzufuhr kann hierbei sowohl seitlich als auch koaxial zum Laserstrahl erfolgen (vgl. Abbildung 11).

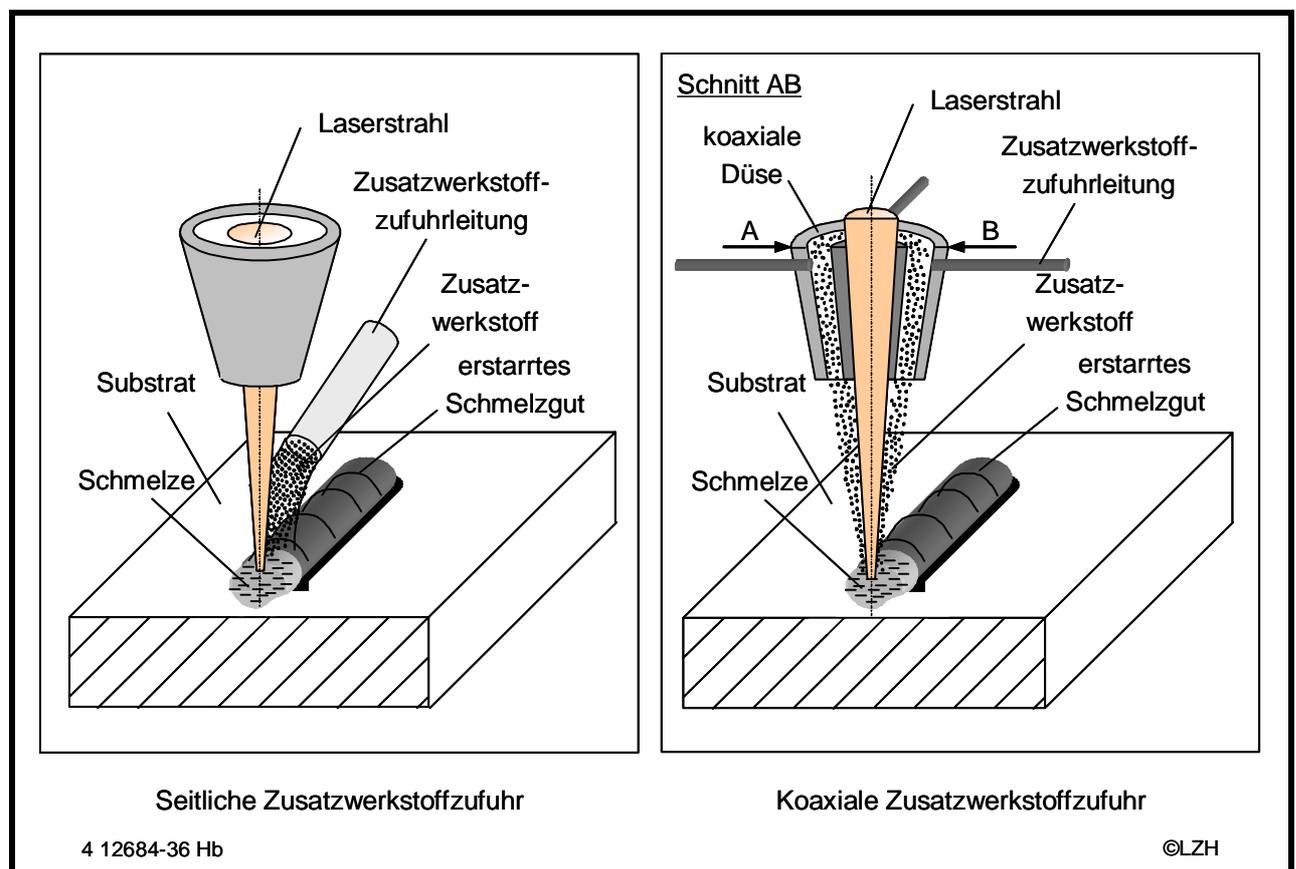


Abbildung 11: Seitliche und koaxiale Pulverzufuhr beim Auftragschweißen

Im Vergleich zu diesem Verfahren handelt es sich beim 3D-Laserstrahlaufragschweißen um die erweiterte Anwendung zur Erzeugung einer Viellagenanordnung einer geforderten Höhe und Breite mit hohen Anforderungen an Homogenität, Porosität und Oberflächenqualität. Bereits Anfang der neunziger Jahre wurde dieses Verfahren zur Herstellung von metallischen Prototypen im Versuchsstadium zur Untersuchung der geometrischen Mög-

lichkeiten genutzt. Von einer amerikanischen Forschungsstelle konnte hierbei unter dem Begriff „Direct Light Fabrication“ die Eignung des Verfahrens bzgl. einer angemessenen Erzeugung von Oberflächenqualitäten mit verbesserten metallurgischen Eigenschaften nachgewiesen werden.[79,80,81,82] Die Verfahren Laser Direct Cladding (LDC) und Selective Laser Cladding (SLC) basieren ebenfalls auf demselben Prinzip. Wesentlicher Unterschied ist die Verwendung einer coaxialen Düse, die das Gemisch aus Zusatzwerkstoff und Trägergas coaxial zum Laserstrahl zuführt und durch deren Anordnung eine Fokussierung des Pulverstrahls auf die Wechselwirkungszone von Laserstrahl und Material erfolgt. Im Gegensatz zur Verwendung der seitlichen Pulverzufuhr ist die Verweilzeit des Pulvers im Laserstrahl vor dem Auftreffen auf das Substrat höher, wodurch es zu einer verstärkten Wechselwirkung des Laserstrahls und des Pulverstrahls kommt. Hierdurch sollen besonders schmale Bahnen erzeugt werden können.[83,84] Weiterer Vorteil bei der Verwendung einer coaxialen Düse ist die Möglichkeit einer richtungsunabhängigen Arbeitsweise, wohingegen die Auftragbedingungen bei einseitiger Zuführung richtungsabhängig sind.

Zu einer Kommerzialisierung dieses Verfahrens ist es lediglich bei den Verfahren Laser Engineering Net Shaping (LENS) [85] und beim Direct Metal Deposition (DMD) [86] gekommen. Bei beiden Verfahren handelt es sich ebenfalls um die Technologie des Laserstrahlaufragschweißens, wobei der wesentliche Unterschied in der Verwendung der unterschiedlichen Laserstrahlquellen liegt.

5.2 Verfahrensparameter des 3D-Laserstrahlaufragschweißens

Die Eigenschaften der auf diese Weise aufgebauten Geometrien hängen in erster Linie von den Eigenschaften der auftraggeschweißten Einzelbahnen und somit von den innerhalb dieser Bahnen gewählten Parametern ab. Je nach Wahl der Parameter und deren Zusammenspiel bilden sich unterschiedliche Einzelbahngeometrien, sowie verschiedene Aufmischungsgrade mit dem Grundwerkstoff bzw. der darunter liegenden Bahn und beeinflussen hierdurch auch die Anbindung der Einzelbahnen untereinander. Neben makroskopischen Defekten werden auch mikroskopische Defekte wie z. B. Poren- und Rissbildung durch unterschiedliche Temperaturgradienten sowie die Gefügeausbildung und damit nicht zuletzt auch die mechanischen Eigenschaften der Einzelbahnen durch die Wahl der Parameter bestimmt. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die Konsistenz des Zusatzwerkstoffes beim Auftreffen auf die Substratoberfläche. Die Partikel sollten auf der einen Seite so warm sein, dass eine Adhäsion auf der Substratoberfläche als Voraussetzung zur Raupenbildung stattfindet. Sie dürfen jedoch nicht überhitzt werden, da sonst eine Verdampfung von Teilen der Partikel stattfindet, die wiederum durch

Ionisations- und Plasmabildung zu einer Abschirmung der Laserstrahlung führt. Dies wiederum erfordert einen bestimmten Energieeintrag im Verhältnis zum Pulvermassenstrom unter Beibehaltung einer konstanten Pulver-Strahl-Wechselwirkungszeit jeweils in Abhängigkeit der Partikelfraktionsgröße. Die wesentlichen sich aus der Variation der Laserstrahlleistung und der Vorschubgeschwindigkeit ergebenden Kenngrößen sind in der Abbildung 12 dargestellt.

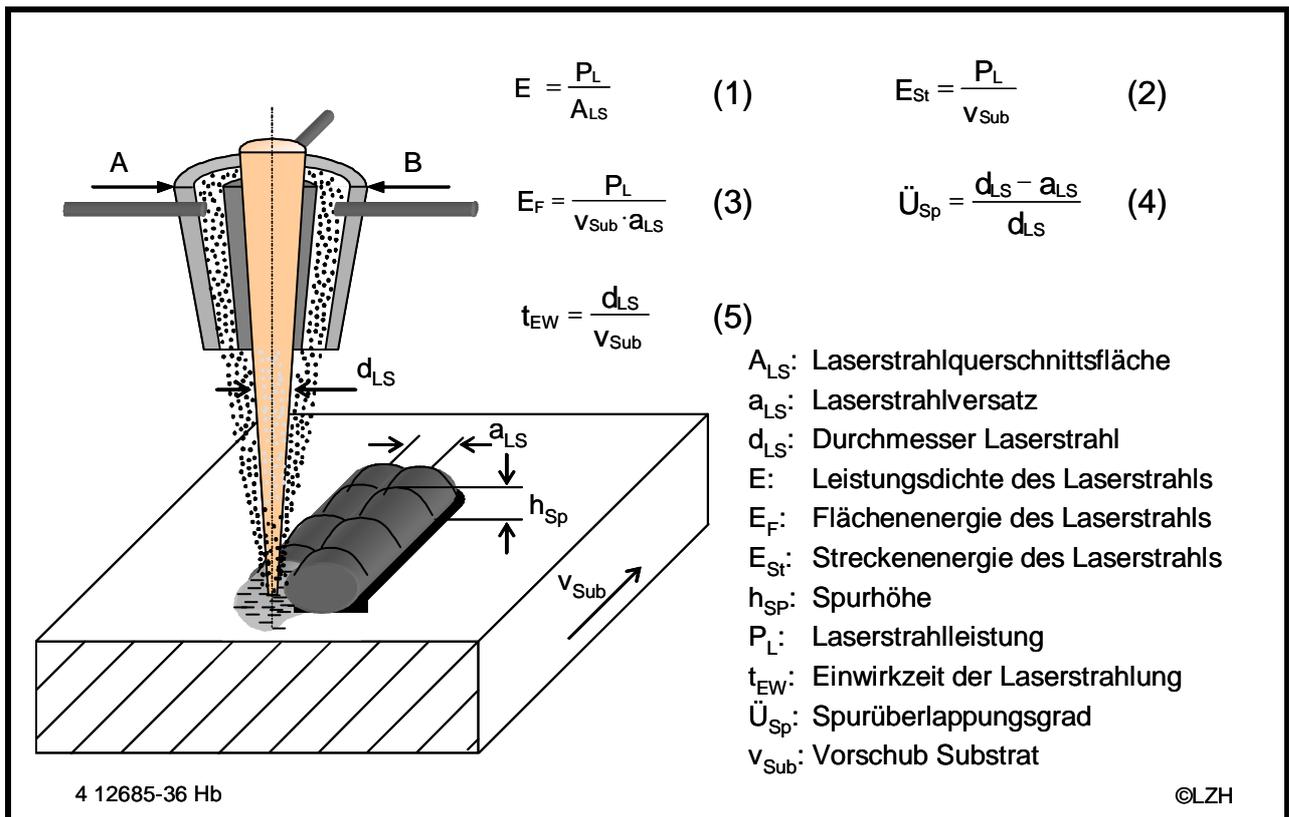


Abbildung 12: Wesentliche Kenngrößen des 3D-Laserstrahlaufragschweißprozesses

Zur ganzheitlichen Betrachtung des komplexen Vorganges sind die wesentlichen Einflussgrößen des 3D-Laserstrahlaufragschweißens in Form eines Ishikawa-Diagrammes unter Aufteilung in die vier Hauptfaktoren Laserstrahl, Maschine, Bauteil und Partikelstrahlformung in der Abbildung 13 strukturiert dargestellt.

5.3 Strahl-Stoff-Wechselwirkung

Grund für die o. g. Phänomene sind die beim Auftragschweißen stattfindenden komplexen Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Auftreffen der elektromagnetischen Strahlung auf die vorhandenen Oberflächen. In Abhängigkeit der physikalischen Eigenschaften der Oberflächen stellen sich unterschiedliche Verhältnisse der absorbierten, reflektierten und transmissiven Anteile ein, die in der Literatur mit Absorptionsgrad A, Reflexionsgrad R und Transmissionsgrad T bezeichnet werden. Aus der Energieerhaltung ergibt sich, dass die Summe der Anteile immer die einfallende Laserstrahlleistung ergibt:

$$A + R + T = 1 \quad \text{mit:} \quad A = \frac{P_A}{P_L}; \quad R = \frac{P_R}{P_L}; \quad T = \frac{P_T}{P_L} \quad (6)$$

Der transmissive Anteil kann bei Metallen aufgrund der geringen optischen Eindringtiefe von nur wenigen Mikrometern zu Null gesetzt werden.[87]

Die Besonderheit bei der Verwendung von Zusatzwerkstoffen innerhalb des Auftragschweißens bedingt, dass die Laserstrahlung vor dem Auftreffen auf das Substrat zunächst in Wechselwirkung mit dem Zusatzwerkstoff tritt, welches die im Folgenden aufgeführten Fallunterschiede bedingt [88,89,90], die in der Abbildung 14 verdeutlicht werden.

- 1: Strahlenanteile treffen auf Partikel und werden zum einen Teil absorbiert und zum anderen Teil reflektiert.
 - 1a) Reflektierter Anteil geht verloren.
 - 1b) Reflektierter Anteil trifft auf Partikel und wird wiederum zum Teil absorbiert und reflektiert, danach Fall 1a) oder 1b).
 - 1c) Reflektierter Anteil wird durch Mehrfachreflexion vollständig von Partikeln absorbiert.
 - 1d) Reflektierter Anteil trifft direkt auf Vollmaterial in der effektiven Strahl-Stoff-Wechselwirkungszone.
- 2: Strahlenanteile treffen ungehindert von Partikeln direkt auf Vollmaterial und werden zum Teil absorbiert und zum Teil reflektiert.
 - 2a) Reflektierter Teil trifft auf Partikelunterseite und wird zum Teil absorbiert und reflektiert, danach Fall 1a) oder 1b).
 - 2b) Reflektierter Anteil geht verloren.

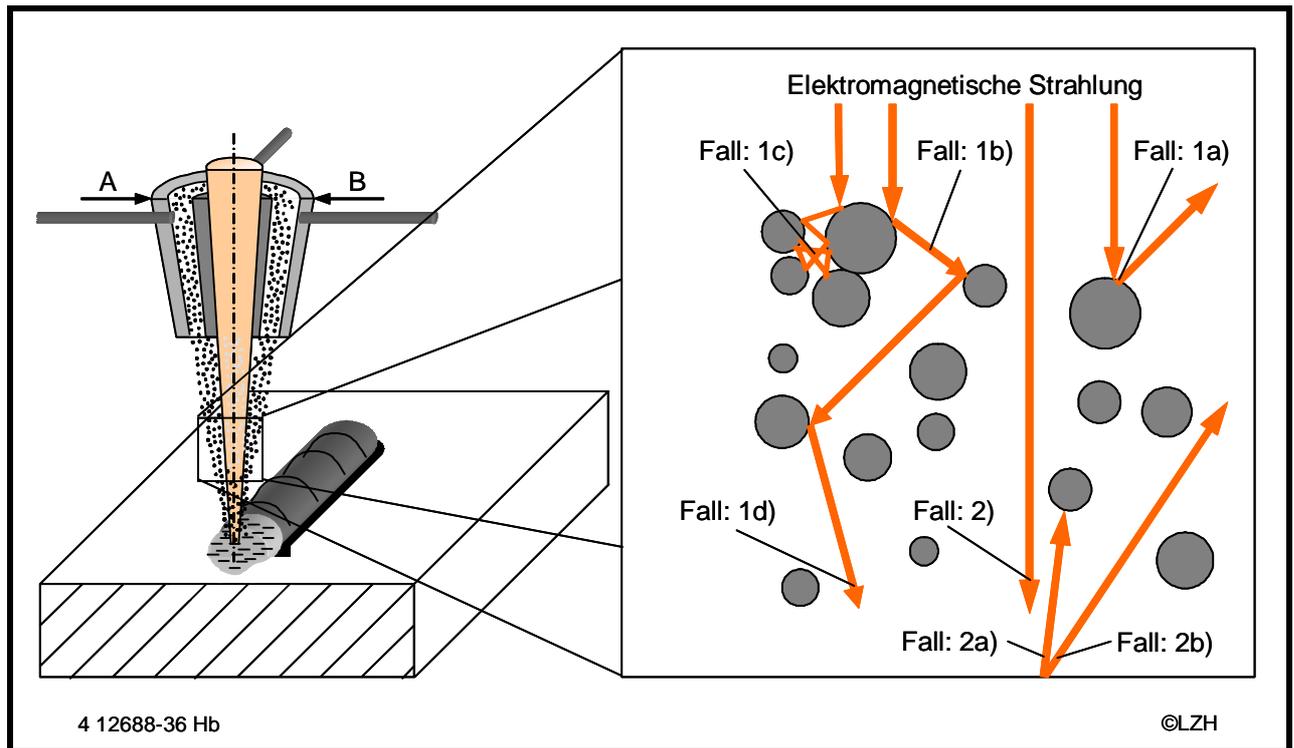


Abbildung 14: Wechselwirkungen Strahlung-Stoff beim Auftragschweißen

Wie hoch der Anteil der Strahlung ist, der direkt auf das Vollmaterial auftrifft, hängt also im Wesentlichen vom Transmissionsgrad der Pulver-Gas-Strömung ab, welcher sich aus dem Verhältnis der ungeschwächten Ausgangsintensität zu den Intensitätsanteilen nach Durchlaufen einer Strecke x_L durch die Pulver-Gas-Strömung ergibt.

$$T = \frac{I_{x_L}}{I_0} \quad (7)$$

Ersetzt man das Verhältnis der geschwächten zur ungeschwächten Intensität durch das Gesetz von Lambert-Beer, welches die exponentielle Abnahme der Intensität in Abhängigkeit von der Schichtdicke beschreibt, ergibt sich der Transmissionsgrad zu:

$$T = \frac{I_{x_L}}{I_0} = \frac{1}{e^{(n_P \sigma_{\text{ext}} x_L)}} \quad (8)$$

Für die Wechselwirkung eines sphärischen Partikels mit elektromagnetischer Strahlung entwickelte Gustav Mie die nach ihm benannte Theorie.[91,92] Ausgangspunkt für die Betrachtungen von Mie ist eine ebene elektromagnetische Welle, die sich in einem Medium mit dem Brechungsindex n_1 ausbreitet, in dem sich kugelförmige Partikel mit einem im allgemeinen komplexen Brechungsindex n_2 bewegen. Ausgehend von den Maxwell-Gleichungen für die elektrischen und magnetischen Feldkomponenten lassen sich daraus in Kugelkoordinaten Differentialgleichungen für die Winkel- sowie den Radialanteil auf-

stellen.[91,93,94] Für den Radialanteil zeigt sich, dass die Lösungen nur vom Verhältnis des Kugelumfanges zur Wellenlänge im jeweiligen Medium und deren Brechungsindizes abhängen. Zur mathematischen Beschreibung sind die sog. Mie Parameter α_{Mie} und β_{Mie} eingeführt worden:

$$\alpha_{\text{Mie}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{P}}}{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot r_{\text{P}}}{\lambda_0} \quad (9)$$

$$\beta_{\text{Mie}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2 \cdot r_{\text{P}}}{\lambda_0} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \alpha_{\text{Mie}} \quad (10)$$

In Abhängigkeit vom Verhältnis Kugelumfang zu Wellenlänge lässt sich die Art der Streuung in die Bereiche geometrische Optik, Rayleigh- und Mie-Streuung unterteilen, wobei die beiden ersteren Grenzfälle der Mie-Theorie darstellen.

Innerhalb der Mie-Parameter werden die folgenden Bereiche unterschieden [95]:

- Rayleighstreuung für $\alpha_{\text{Mie}} < 0,2$ (11)

- Mie-Streuung für $0,2 < \alpha_{\text{Mie}} < 300$ (12)

- Geometrische Optik für $\alpha_{\text{Mie}} > 300$ (13)

Unter Berücksichtigung der für den späteren Anwendungsfall verwendeten Wellenlänge von $\lambda = 1030 \text{ nm}$ ergibt sich als Anwendungsbereich für die Mie-Streuung aus der Gleichung (9) ein Partikelgrößenbereich von $0,066 \text{ }\mu\text{m}$ bis $98 \text{ }\mu\text{m}$.

Mit Hilfe von Übergangsbedingungen lassen sich Wirkungsquerschnitte für die Streuung σ_{sca} und die Extinktion, d. h. der Summe aus Streuung und Absorption, $\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{sca}} + \sigma_{\text{abs}}$ berechnen. In der Mie-Theorie werden anstelle des Wirkungsquerschnitts häufig die sog. Effizienzfaktoren Q_i angegeben, die das Verhältnis des Wirkungsquerschnitts zur senkrecht zum Strahl orientierten Fläche darstellen.

$$Q_{\text{sca}} = \frac{\sigma_{\text{sca}}}{\pi \cdot r_{\text{P}}^2} = \frac{2}{\alpha_{\text{Mie}}^2} \sum_{k=0}^{\infty} (2k+1) \left(|a_k|^2 + |b_k|^2 \right) \quad (14)$$

$$Q_{\text{ext}} = \frac{\sigma_{\text{ext}}}{\pi \cdot r_{\text{P}}^2} = \frac{2}{\alpha_{\text{Mie}}^2} \sum_{k=0}^{\infty} (2k+1) \text{Re}_{\text{Ext}}(a_k + b_k) \quad (15)$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}} \quad (16)$$

Unter Hinzuziehung der Gleichung (15) für den Anwendungsfall der Wechselwirkung von Laserstrahlung mit Pulverpartikeln ergibt sich der Transmissionsgrad durch Einsetzen in Gleichung (8) zu:

$$T = \frac{I_{xL}}{I_0} = \frac{1}{e^{(n_P \sigma_{ext} x_L)}} = \frac{1}{e^{(n_P Q_{ext} \pi r_P^2 x_L)}} \quad (17)$$

Die Partikelanzahldichte lässt sich aus dem Massenstrom der Partikel, der Geschwindigkeiten der Partikel und damit der Verweilzeit des Partikels im Laserstrahl sowie der Masse eines Partikels berechnen:

$$n_P = \dot{m}_P \cdot \left(\frac{D_{Fl}}{V_P \cdot \rho_P \cdot V_{LS}} \right) \quad (18)$$

Die Berechnung der Partikelanzahldichte erfolgt mit Hilfe der in der Abbildung 15 dargestellten Vereinfachungen, die im Folgenden kurz erläutert werden.

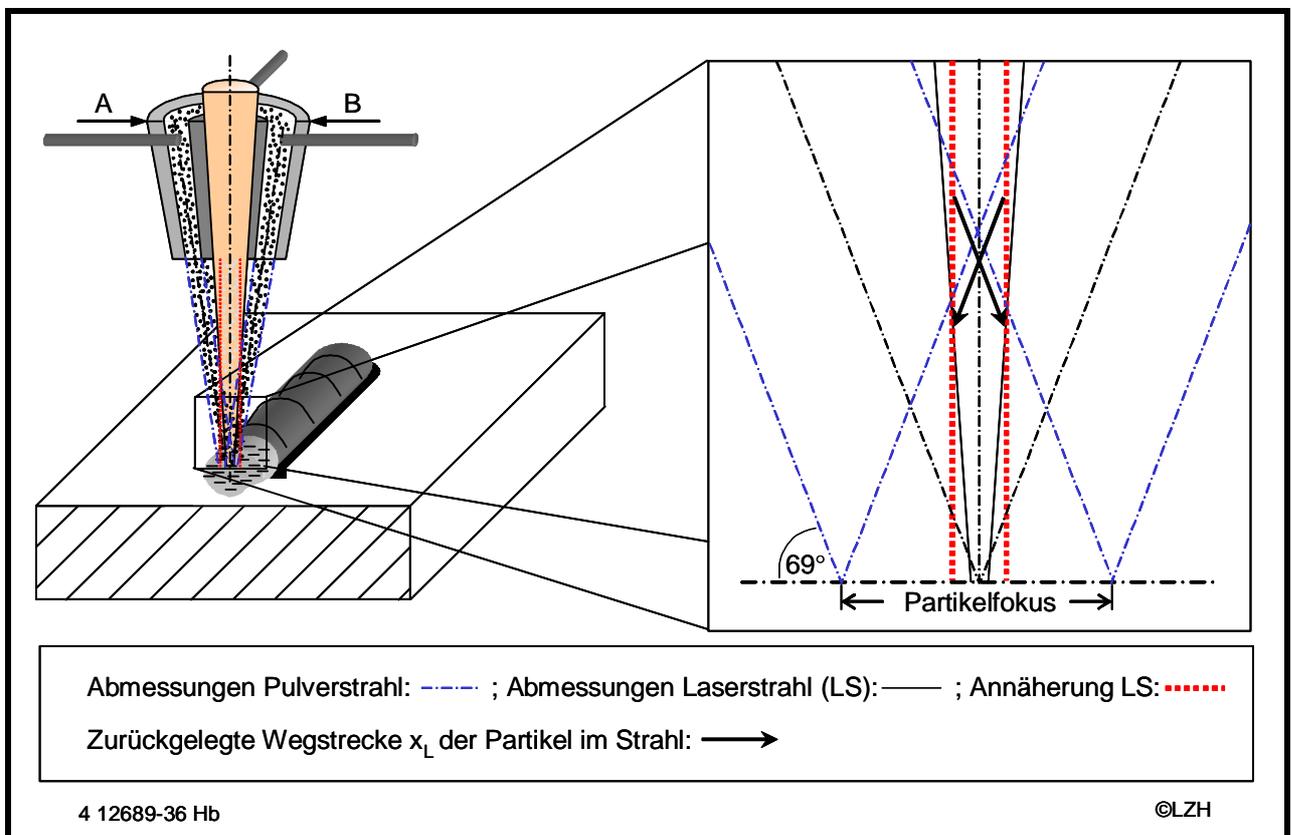


Abbildung 15: Vereinfachungen zur Berechnung des Transmissionsgrades

Mit der Annahme eines zylindrischen Strahlprofils, das dem konischen angenähert worden ist, sowie einer Nichtaufweitung des Partikelströmungsprofils nach Verlassen der Düse kann der Transmissionsgrad unter der Annahme eines konstanten Partikelmassenstroms in Abhängigkeit unterschiedlicher Partikelgrößen dargestellt werden. Hierzu wird der Massenstrom in zwei Anteile geteilt, wobei der eine Anteil am Prozess beteiligt ist, der andere nicht. Zur Berechnung der Partikelanzahldichte wird lediglich der am Prozess beteiligte Anteil berücksichtigt. Ausgehend von der durch Laser Doppler Anemometrie

(LDA) ermittelten mittleren Geschwindigkeit der Partikel von 2 m/s erfolgt die Berechnung der Fluglänge und der Verweilzeit der Partikel im durch den Zylinder angenäherten Laserstrahl (vgl. Abbildung 15). Der ursprünglich am Prozess beteiligte Anteil in den Laserstrahl zurückreflektierender Partikelanteile bleibt bei der Berechnung unberücksichtigt.

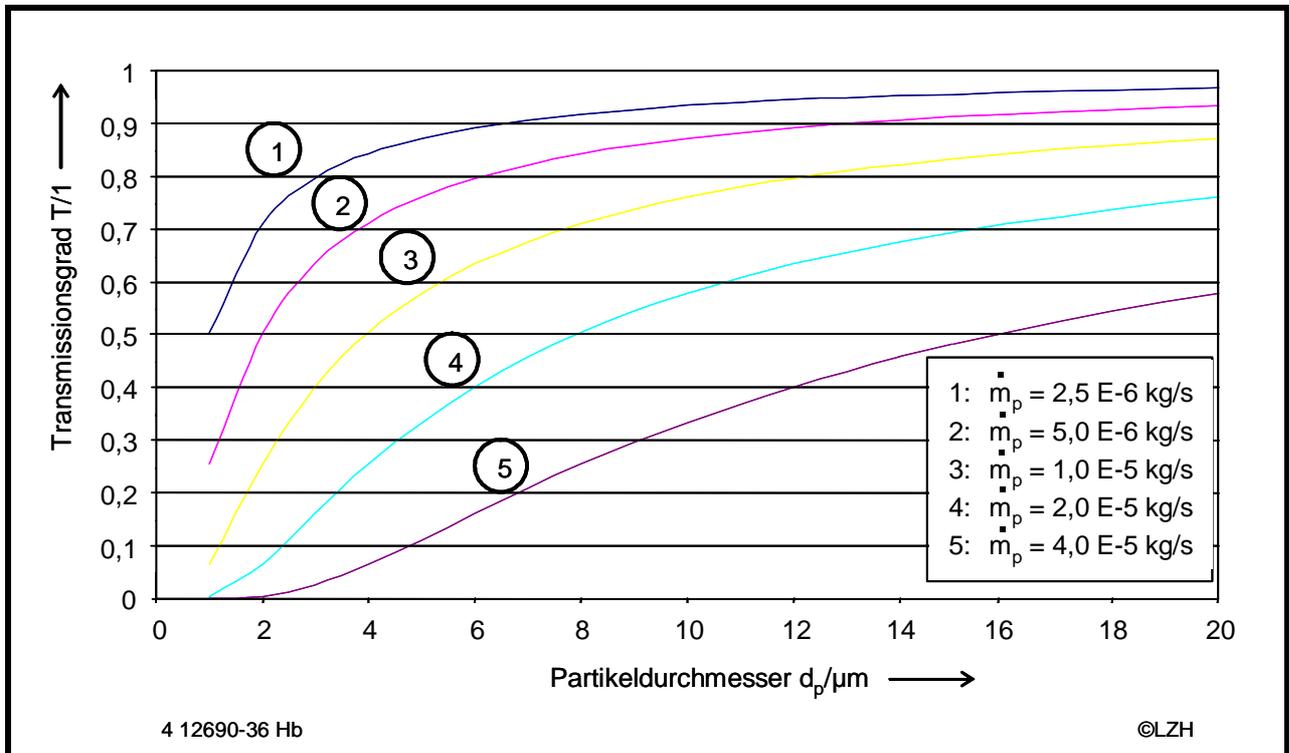


Abbildung 16: Darstellung des Transmissionsgrades in Abhängigkeit der Partikeldurchmesser 1-20 μm unter Variation des Massenstroms

In Abbildung 16 ist der anhand der Gleichung (17) errechnete Transmissionsgrad als Funktion des Partikeldurchmessers im Bereich von 0 bis 20 μm unter Variation des Massenstromes dargestellt. Die eingesetzten im Vergleich mit makroskopischen Anwendungen sehr kleinen Massenströme stellen hierbei einen für die Mikrobearbeitung realistischen Bereich dar. Anhand der Abbildung wird deutlich, dass der Transmissionsgrad bei der Verwendung von kleinen Partikeln im betrachteten Anwendungsfall sehr stark abnimmt und trotz eines gegenüber konventionellen Anwendungen vergleichsweise sehr geringen Pulvermassenstroms sehr schnell gegen null strebt, was mit einer vollständigen Absorption der Strahlung innerhalb des Pulverstromes einhergeht. Auf die dargestellten Erkenntnisse wird zu einem späteren Zeitpunkt der Arbeit noch einmal problembezogen Bezug genommen.

6 Entwicklung und Qualifizierung der Versuchsanlage

In Abbildung 17 sieht man die für den Prozess des 3D-Mikro-Laserstrahlauftragsschweißens aufgebaute Versuchsanlage. Die wesentlichen Komponenten sind gekennzeichnet.

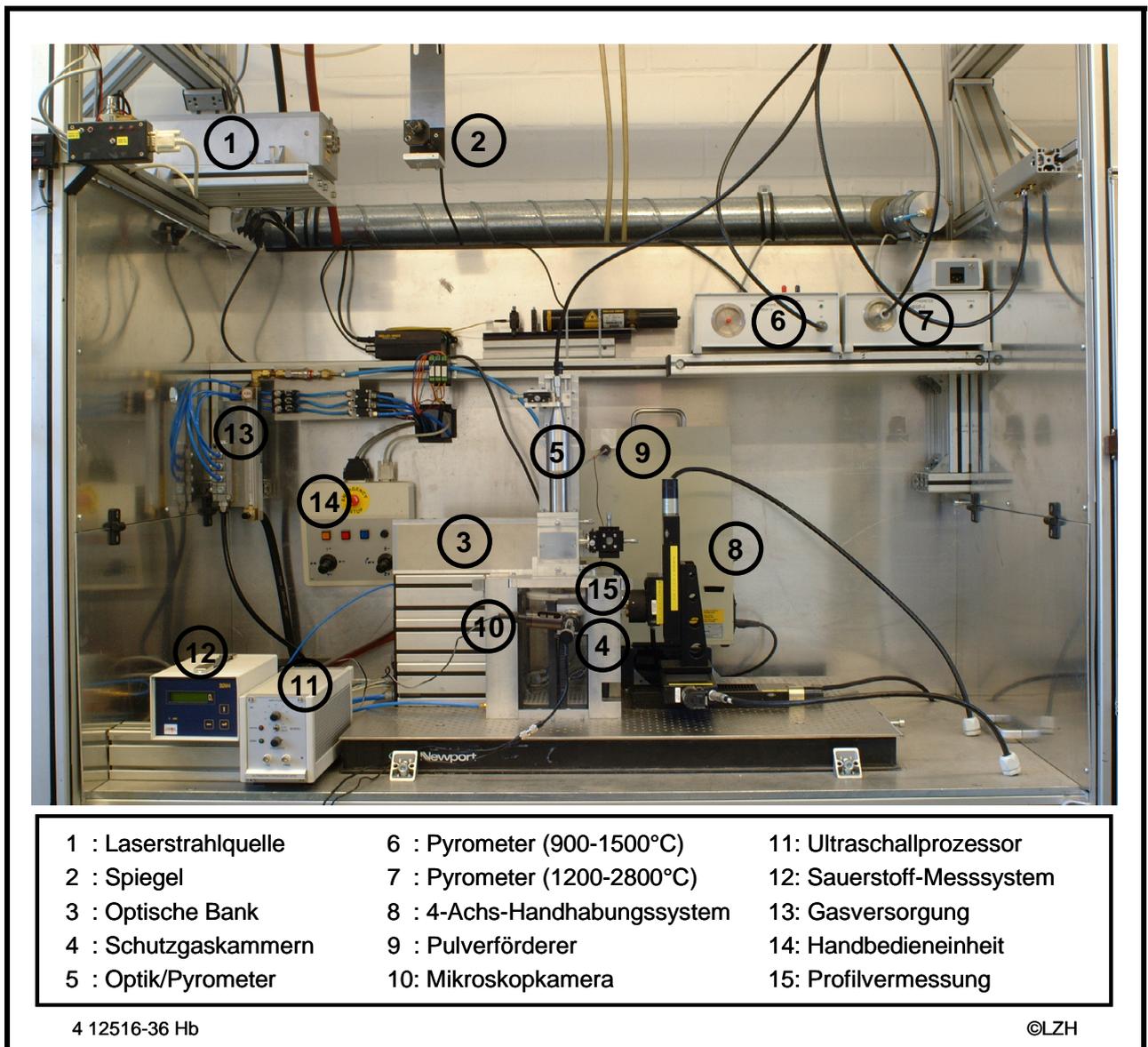


Abbildung 17: Aufbau der Versuchsanlage

Im Wesentlichen lässt sich die Anlagentechnik in vier Hauptblöcke (HB) einteilen: Strahlerzeugung, -führung, -formung und -regelung (HB-1), Zusatzwerkstofftransport und -fokussierung (HB-2), Peripheriekomponenten (HB-3) und Automatisierung (HB-4). Die Funktionen der Hauptblöcke werden jeweils durch Einzelkomponenten und deren Zusammenspiel gesichert und ständig auf ihre Funktionsfähigkeit abgefragt. Zur Verdeut-

lichung der Hauptblöcke und deren Interdisziplinarität sind diese in der Abbildung 18 mit den wesentlichen Material- und Signalflüssen schematisch dargestellt. Die Hauptblöcke werden im Folgenden mit ihren Einzelkomponenten erläutert und hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisiert, wobei insbesondere die Strahlqualität und damit eng zusammenhängend die Strahlfokussierbarkeit sowie die Leistungseigenschaften im Vergleich zu makroskopischen Anwendungen den wesentlichen Ausschlag der Eignung zur Mikromaterialbearbeitung geben.

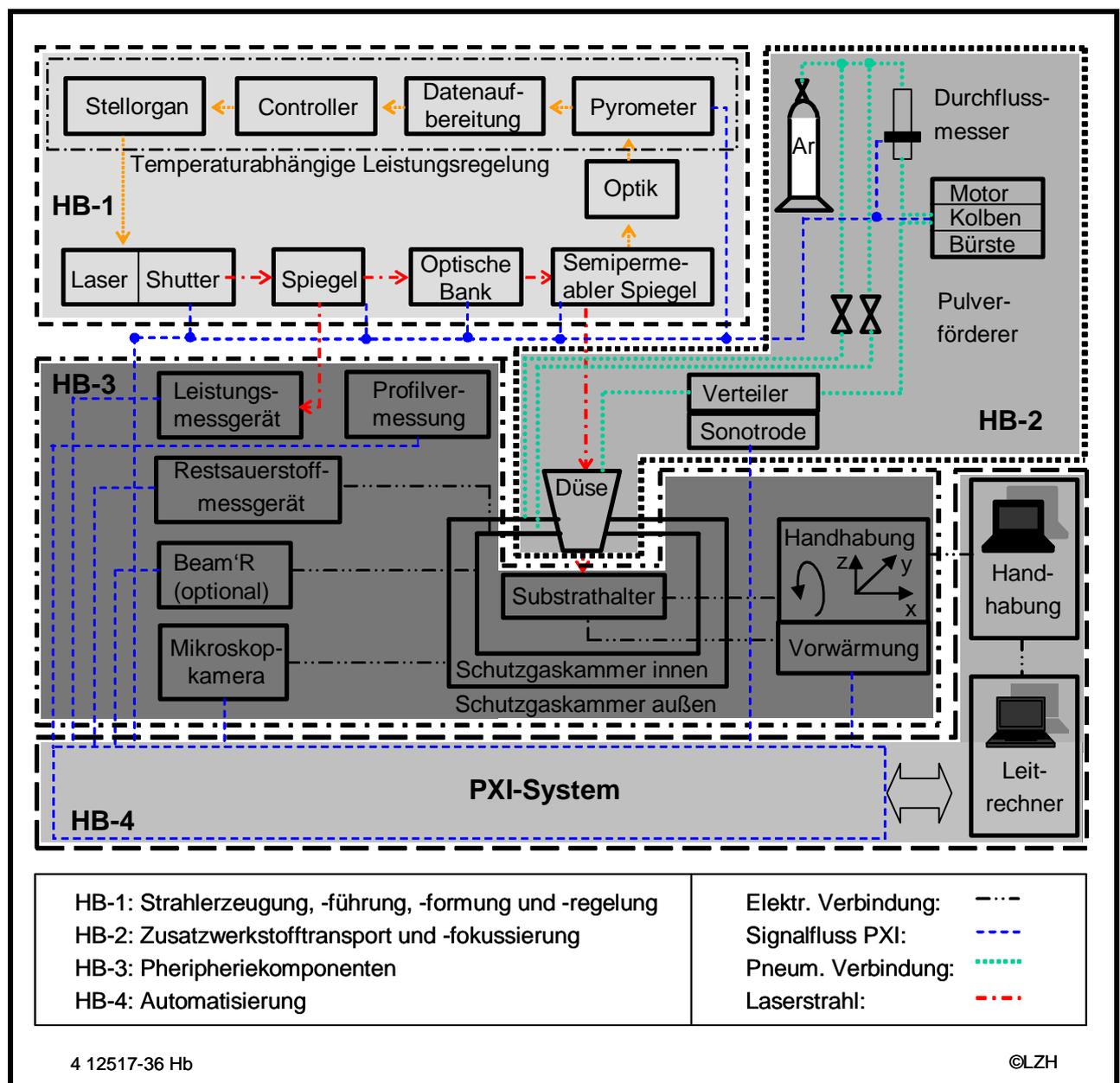


Abbildung 18: Schematischer Aufbau der Gesamtanlage

6.1 Strahlerzeugung, -führung, -formung und -regelung (HB-1)

6.1.1 Strahlerzeugung und -eigenschaften

6.1.1.1 Laserstrahlquelle

Bei der verwendeten Laserstrahlquelle handelt es sich um einen diodengepumpten Yb:YAG-Scheibenlaser, dessen herausragender Vorteil im Vergleich zu anderen diodengepumpten Festkörperlasern im Nichtauftreten von thermooptischen Effekten besteht. Der Aufbau des Scheibenlasers ist in der Abbildung 19 dargestellt.

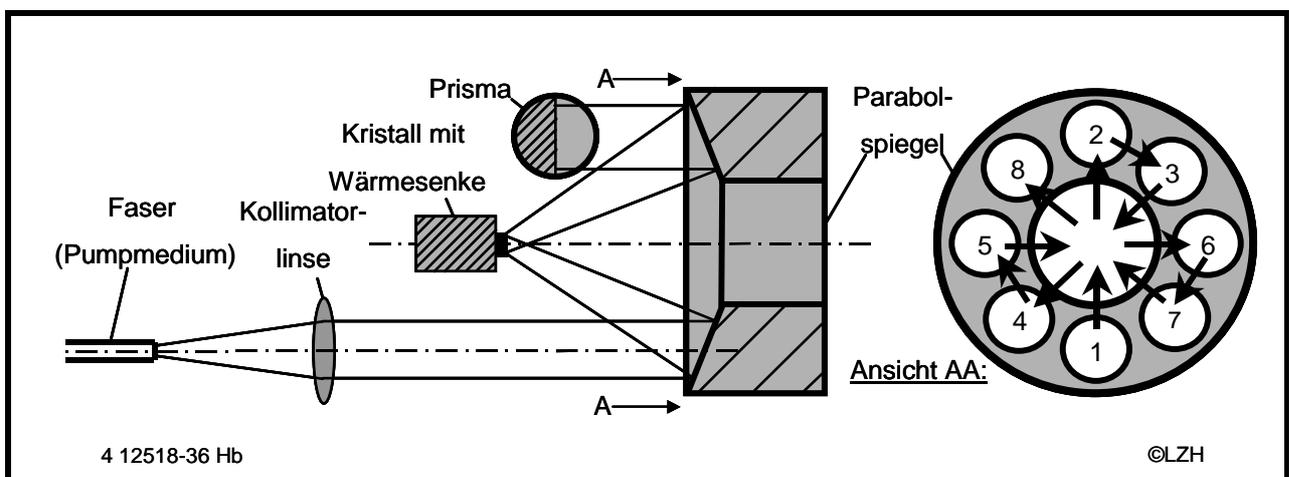


Abbildung 19: Scheibenlaserdesign mit 16 Strahlungsdurchgängen [100]

Das Wirkprinzip zur Verhinderung von thermooptischen Effekten basiert auf der Verwendung eines sehr dünnen Kristalls mit einer Dicke $t_k \ll d_k$ mit einem runden Durchmesser, welcher mit einer seiner Oberflächen auf einer Wärmesenke befestigt ist. Diese Oberfläche ist mit einer sowohl für die Wellenlänge des Lasers als auch für die der Pumpquelle reflektierenden Schicht versehen. Im einfachsten Fall basiert der Resonator auf einer linearen Anordnung, welche aus einer Kristallscheibe und einer Auskoppereinheit besteht. Als problematisch bei der Verwendung der dünnen Kristallscheibe zeigt sich jedoch der geringe Anteil des absorbierten Pumplichtes beim Durchlaufen der extrem kurzen Strecke. Zur Erhöhung des Absorptionsgrades des Pumplichtes sollte dasselbe den Kristall daher mehrfach passieren.

Realisiert worden ist dieses durch die Verwendung eines Parabolspiegels. Die Pumpstrahlung wird hierbei vor dem Auftreffen auf den Parabolspiegel kollimiert, so dass im Fokus dieses Spiegels ein Abbild der Pumpquelle entsteht. An dieser Stelle wird die Scheibe positioniert. Die beim Durchlaufen des Kristalls nicht absorbierte Strahlung wird durch eine aufgebraute für die Strahlung hochreflektierende Schicht reflektiert, verlässt

die Kristallscheibe und trifft auf die der Eingangsstrahlung gegenüberliegenden Seite des Parabolspiegels und wird wieder kollimiert. Unter Verwendung eines Prismas wird die Strahlung auf eine andere Stelle des Parabolspiegels reflektiert und im Anschluss erfolgt eine weitere Fokussierung auf den Kristall. Unter Verwendung von zwei weiteren Prismen erfolgen insgesamt acht Strahlungsdurchgänge. Nach dem Verlassen des letzten Segments des Parabolspiegels wird die Strahlung durch einen Planspiegel in sich selbst zurückgeworfen, wodurch sich insgesamt 16 Strahlungsdurchgänge ergeben. [96,97,98,99,100,101] Verwendet wurde in dieser Arbeit ein nach dem beschriebenen Prinzip arbeitender Yb:YAG Scheibenlaser (Wellenlänge 1030 nm) mit einer Ausgangsleistung von 20 W, dessen Strahleigenschaften im Folgenden charakterisiert werden.

6.1.1.2 Charakterisierung des Rohstrahls

Zur Vermessung der Strahlcharakteristik des Rohstrahls ist bei der Aufnahme des Strahlprofils und der Intensitätsverteilung ein Beam'R-Messsystem der Firma LASER 2000 zum Einsatz gekommen (vgl. Kapitel 6.3.5). Für die Leistungsmessungen wurde ein Leistungsmesskopf (Fabrikat Coherent, Typ LM 250) verwendet. Innerhalb der Messungen wurden drei Messpunkte aufgenommen (Strahlaustritt aus Laseraggregat, direkt vor Eintritt in die optische Bank und ein Wert im Bereich der halben Wegstrecke), wobei die freie Weglänge des Rohstrahls bis zum Ort der Strahlformung 1115 mm beträgt.

Zur Erfassung des möglichen Einflusses der in den Strahlengang integrierten 90°-Umlenkspiegel sind die Messungen in den entsprechenden Abständen mit integrierten Spiegeln wiederholt worden.

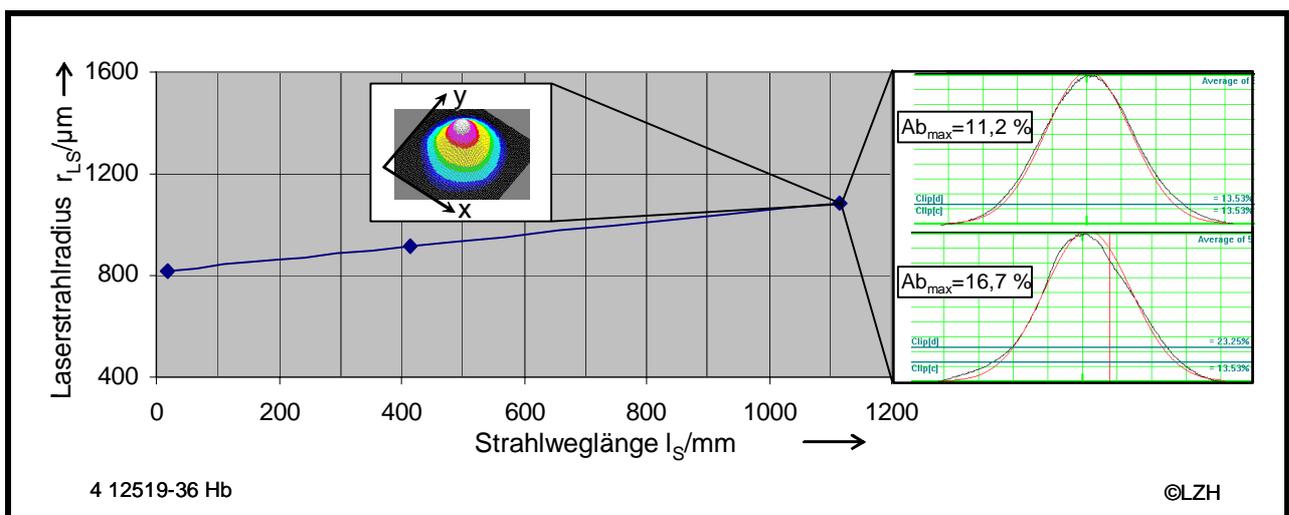


Abbildung 20: Charakterisierung des Rohstrahls

Im linken Teil der Abbildung 20 ist das Ergebnis der Rohstrahlmessungen an den genannten Punkten dargestellt und durch das gemessene Intensitätsprofil ergänzt worden. Im rechten Teil der Abbildung sind für zwei Ebenen des bei dem Intensitätsprofil angegebenen Koordinatensystems die Intensitätsverteilungen unter Einbindung der Gaußkurve hinzugefügt worden. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass das Strahlprofil des Scheibenlasers in erster Näherung einem Gaußprofil entspricht. Bei Wiederholungsmessungen nach einer, vier und acht Stunden zeigte sich der Durchmesser des Rohstrahls bis auf 2,5 % stabil.

6.1.1.3 Charakterisierung des fokussierten Strahls

Die Ausbreitung eines Gaußstrahls durch ein optisches System ist sehr einfach. Die transversale Verteilung der Intensität bleibt in jedem Punkt des optischen Systems gaußförmig, lediglich der Radius des Gaußstrahls und der Krümmungsradius der Wellenfront ändern sich. Im Fall einer kohärenten Lichtquelle mit einer Gaußverteilung und einer ebenen Wellenfront ändert sich in einer Position $z = 0$ die Strahlgröße und die Wellenfront mit z wie in Abbildung 21 dargestellt. Der Strahldurchmesser steigt zunächst langsam, um letztlich proportional zu z anzusteigen. Die Gleichungen, die den Gaußschen Strahlradius $w(z)$ und den Radius der Wellenfront $R(z)$ beschreiben, sind in Abbildung 21 dargestellt. Dabei beschreibt w_0 den Strahlradius im Punkt $z = 0$ und λ die Wellenlänge. Das gesamte Strahlverhalten wird durch diese zwei Parameter spezifiziert.

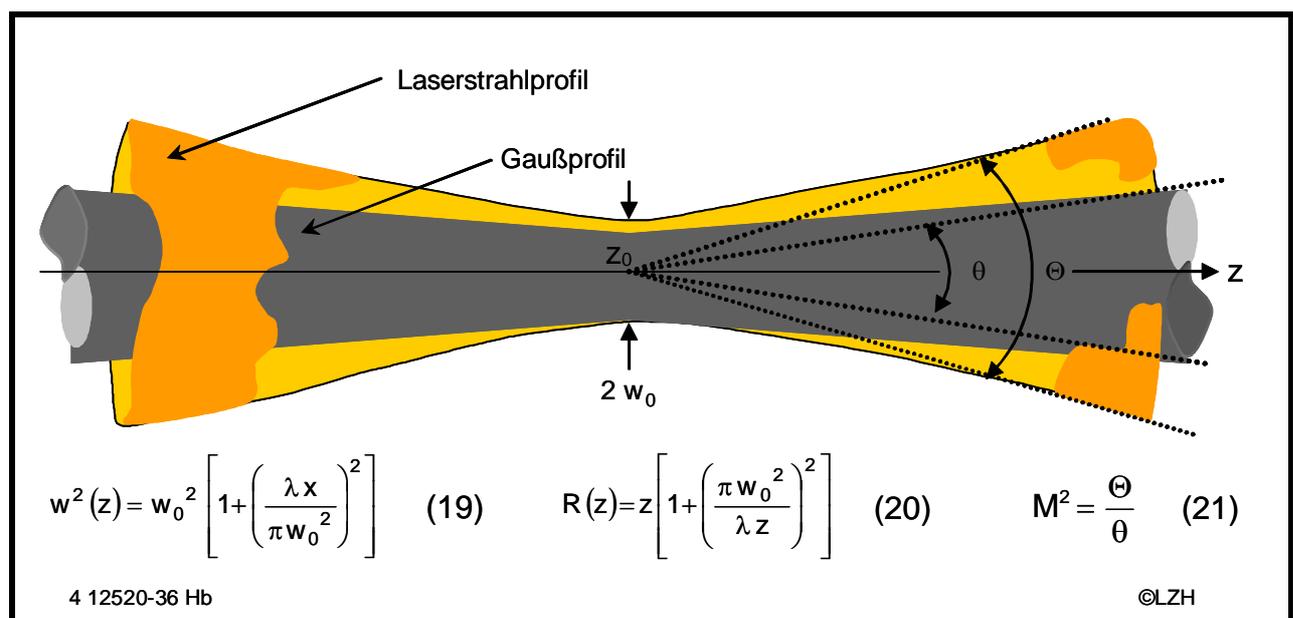


Abbildung 21: Strahlradius, Wellenfront und Strahlparameter

Die Laserstrahlqualität formt die Grenzen für die Fokussierung des Laserstrahls durch ein optisches System und wird im Multimode-Laserbetrieb durch die Anzahl der oszillierenden transversalen Moden bestimmt. Das Verhältnis vom Radius der transversalen Grundmode und der radialen Ausdehnung der Moden höherer Ordnung wird durch den Faktor M^2 bestimmt, welcher somit ein Maß für die Strahlqualität darstellt.

$M^2 = 1$ gilt für die transversale Grundmode (TEM_{00}). In diesem Fall liegt eine beugungsbegrenzte Laserstrahlung vor, d. h. $M^2 > 1$ beziffert die Abweichung vom Grundmode. Zur Bestimmung der Beugungsmaßzahl eines Laserstrahls müssen sowohl der Divergenzwinkel als auch der minimale Strahlradius w_0 bekannt sein.

Zur Ermittlung der Beugungsmaßzahl des Scheibenlasers sind exemplarisch Messungen des fokussierten Laserstrahls durchgeführt worden. Die Messungen ergeben, dass das Intensitätsprofil des Scheibenlasers in sehr guter Näherung einer Gaußform entspricht. Die Breite des Strahls an der gemessenen Position wird aus einer Kurvenanpassung mit einer Gaußfunktion gewonnen. Die Strahlqualität, charakterisiert durch die Beugungsmaßzahl M^2 , kann durch eine Kaustikmessung bestimmt werden. Dazu wird die Breite des Laserstrahls an mehreren mit Hilfe eines Translationstisches angefahrenen Orten entlang der optischen Achse im Bereich der Strahltaile gemessen. Aus dem Kurvenverlauf werden der Strahltaillenradius w_0 und der Divergenzwinkel θ bestimmt und schließlich mit Hilfe der Gleichung aus Abbildung 21 die Beugungsmaßzahl M^2 ermittelt (eine detaillierte Beschreibung der M^2 -Bestimmung durch Kaustikmessung findet sich in [102]). Die Messkurve (Kaustik) kann nun mit dem theoretischen Verlauf angepasst werden, woraus sich der Radius und die Position der Strahltaile sowie der Strahlfaktor M^2 ergeben. Das Ergebnis der Messungen ist in Abbildung 22 dargestellt.

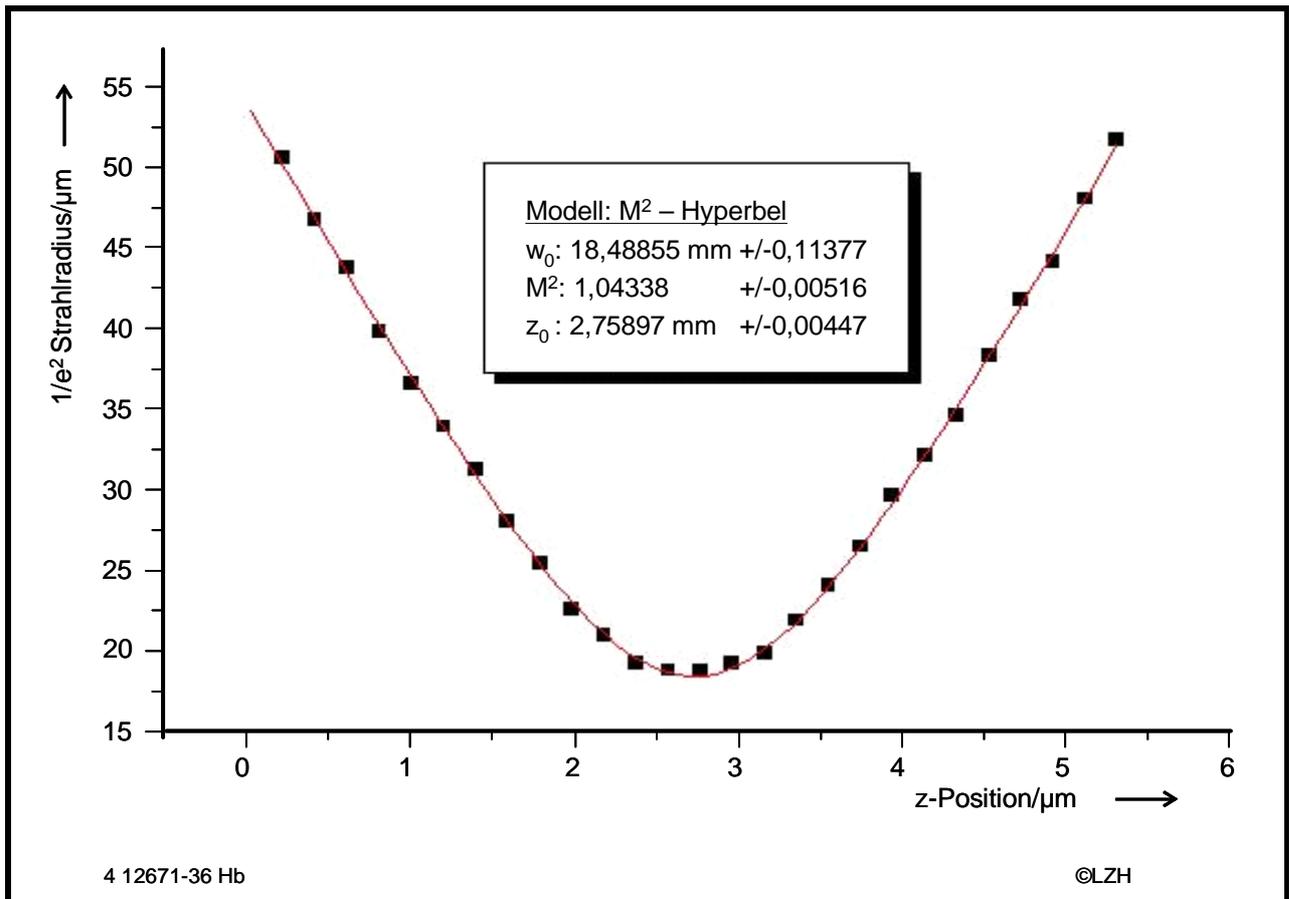


Abbildung 22: Messungen zur Bestimmung der Beugungsmaßzahl

Der Verlauf der durchgezogenen Linie stellt hierbei den theoretisch errechneten Gaußstrahl dar, die Quadrate die gemessenen Abweichungen des Laserstrahls von den theoretisch errechneten Werten. Mit diesem Verfahren wurde die Beugungsmaßzahl des Scheibenlasers zu $M^2 = 1,04 \pm 0,005$ bestimmt, die sich auch bei höheren Ausgangsleistungen nicht merklich ändert. Durch die Verwendung eines entsprechend abgestimmten optischen Systems, welches im Abschnitt 6.1.2 näher beschrieben wird, ist somit die Voraussetzung für eine Fokussierung des Laserstrahls auf nahezu theoretisch kleinstmögliche Fokusdurchmesser und damit die Eignung des Scheibenlasers zum 3D-Mikro-Auftragschweißen gegeben.

6.1.1.4 Charakterisierung der Laserstrahlleistung

Voraussetzung für reproduzierbare Ergebnisse sind geringe Schwankungen innerhalb der Laserparameter und insbesondere der Laserstrahlleistung. Zur Überprüfung möglicher auftretender Leistungsschwankungen, insbesondere durch auftretende Schwankungen innerhalb der Kühlwassertemperatur, sind Langzeit-Leistungsmessungen durchgeführt worden, die in der Abbildung 23 dargestellt sind.

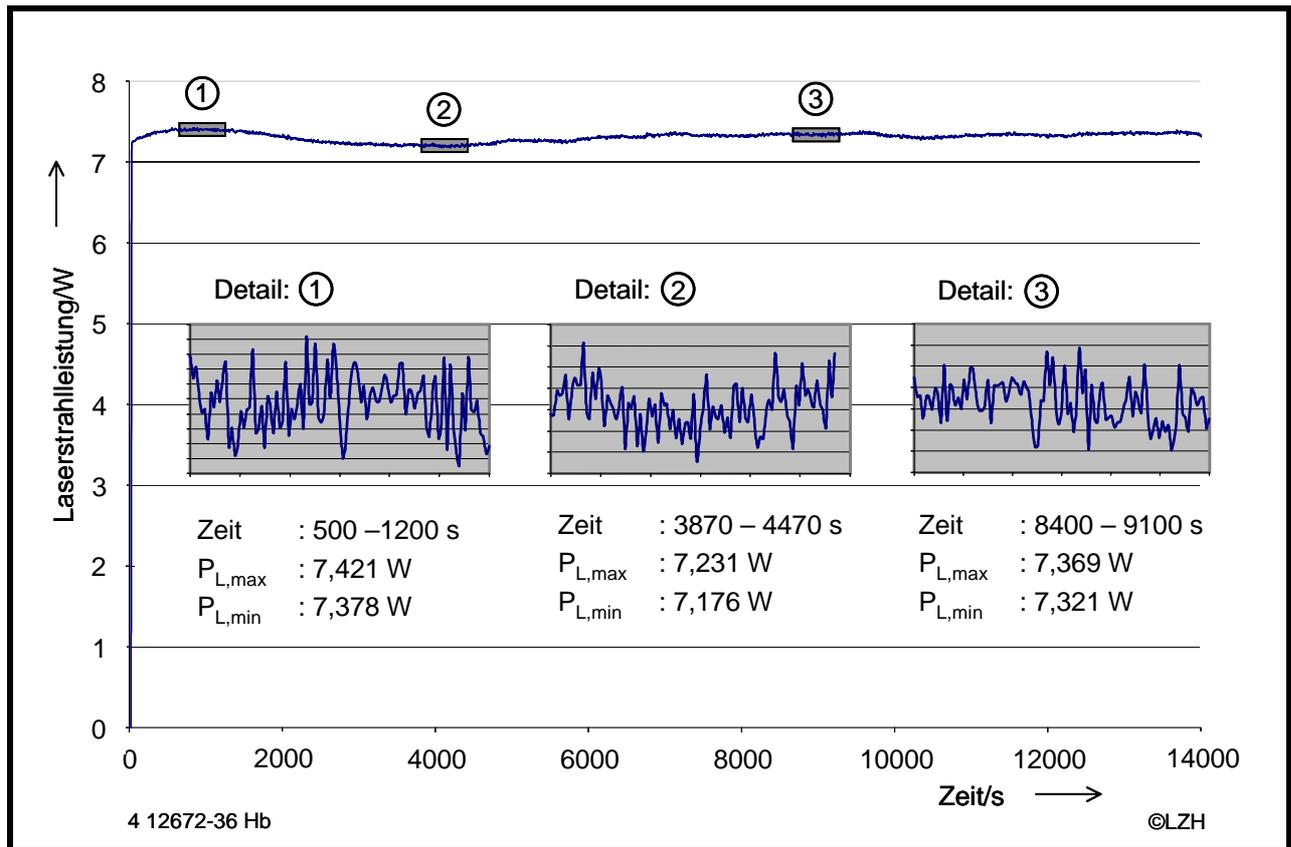


Abbildung 23: Langzeitmessungen der Laserstrahlleistung

In der Abbildung ist der Verlauf der Laserstrahlleistung über einen Zeitraum von nahezu vier Stunden bei einer Auflösung von 200 ms abgebildet. Aus diesem Verlauf sind drei charakteristische Bereiche mit den darin auftretenden Leistungsschwankungen dargestellt. Aus den Graphen wird deutlich, dass die mittlere Schwankung über einen 10-minütigen Zeitraum lediglich 0,7 % beträgt. Betrachtet man hingegen die Leistungsschwankung über den gesamten Bereich, so beträgt diese 3,3 %. Die bei den höheren Auflösungen erkennbaren Leistungsschwankungen sind auf die Kühlwasserhysterese des zur Kühlung der Laserstrahlquelle eingesetzten Kühlwasseraggregats zurückzuführen.

6.1.2 Strahlformung und -führung

Aus den Gleichungen der Abbildung 21 ist ersichtlich, dass bei vorgegebener Wellenlänge und Strahlqualität zur Erzeugung eines kleinen Strahltaillendurchmessers ein möglichst großer Divergenzwinkel bzw. eine große numerische Apertur (N.A.) zu wählen ist. Standardlinsen weisen unter diesen Bedingungen aber starke sphärische Aberrationen auf, welche proportional zur dritten Potenz der numerischen Apertur sind und damit die Erzeugung eines kleinen Strahldurchmessers nicht zulassen.

Zur Erhaltung der Strahlqualität sind daher beugungsbegrenzte Linsen einzusetzen, d. h. Linsen, deren Aberrationen innerhalb des Airy-Beugungsscheibchens liegen. Solche Linsen sind z. B. als asphärische Linsen verfügbar, die mit der molded-glass-Technik hergestellt werden und die selbst bei numerischen Aperturen weit über 0,5 noch beugungsbegrenzt abbilden. Der Nachteil dieser Linsen sind jedoch ihre geringen Brennweiten.

Zur Erhöhung des Arbeitsabstandes sind daher Untersuchungen durchgeführt worden, die die Möglichkeiten einer Integration eines Kepler-Teleskopes zur Vergrößerung des Arbeitsabstandes qualifizieren sollen. Aus diesem Grund sind zwei Hoch-Apertur-Laser-Objektive (HALOs) mit reduzierter sphärischer Aberration hinter einer solchen asphärischen Linse montiert, die die Strahltaille 1:1 vor dem Teleskop abbilden soll. Mit diesem Aufbau konnte ein Strahltaillendurchmesser im Bereich von $15\ \mu\text{m}$ in einem Arbeitsabstand von 50 mm realisiert und vermessen werden. Die Integration der einzelnen optischen Komponenten ist in der Abbildung 24 verdeutlicht.

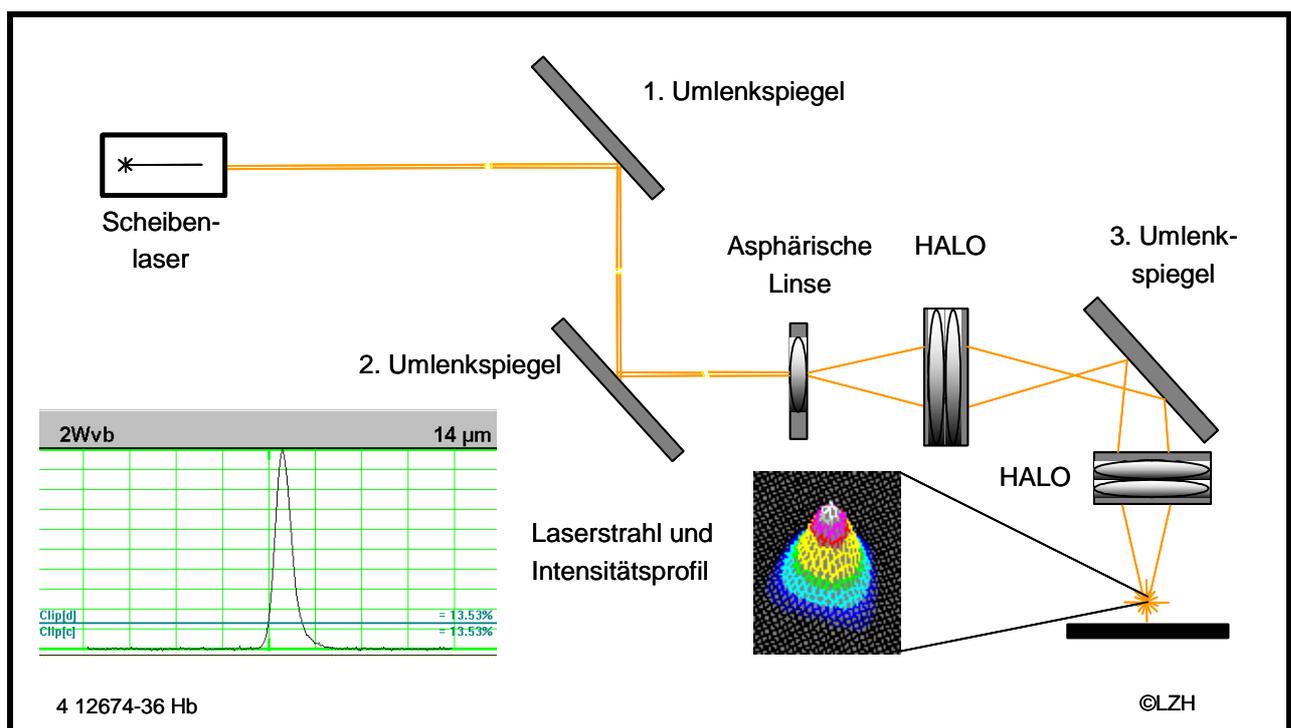


Abbildung 24: Zusammenspiel der optischen Komponenten

6.1.3 Temperaturmessung und Regelung der Laserstrahlleistung

Die Messung der Temperatur ermöglicht neben der direkten zeitlichen Bestimmung von Phasenübergängen insbesondere auch die Detektion von Schweißfehlern und stellt hierdurch ein wichtiges Instrument der Qualitätssicherung von Laserstrahlschweißprozessen

dar. An das Messverfahren werden die Anforderungen einer Integrierbarkeit in die bestehende Prozess- und Anlagentechnik, eine Sensitivität bei Temperaturen deutlich unterhalb der Schmelztemperaturen der verwendeten Materialien und eine den Prozessbedingungen angepasste örtliche Auflösung gestellt.

Als Messverfahren ist aufgrund der flexiblen Einsatzmöglichkeiten die Strahlungs-pyrometrie gewählt worden, bei der die von der Laserstrahlwechselwirkungszone emittierte Wärmestrahlung detektiert und in eine Temperaturinformation transformiert wird. Innerhalb der Strahlungs-pyrometrie werden unterschiedliche Messprinzipien verwendet, bei der z. B. die spektrale Verteilung der beim Prozess emittierten Strahlung mit einer im Messgerät erzeugten Referenzstrahlung verglichen wird. Bei einem anderen Messprinzip wird die Strahldichte des gesamten spektralen Bereiches aufgenommen und über das Stefan-Boltzmann-Gesetz in eine Temperatur umgerechnet. Andere Prinzipien verwenden hingegen nur einen begrenzten Wellenlängenbereich. Gemeinsam haben die genannten Verfahren, dass sie empfindlich auf Änderungen der wirksamen Apertur der Messanordnung reagieren.

Insbesondere in der Mikrotechnik ist der Messfleckdurchmesser des Pyrometers häufig größer als die induzierte Laserstrahlwechselwirkungszone, wodurch nicht eindeutig zwischen einem Geometrie- und einem Temperatureffekt unterschieden werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass zur Transformation der detektierten Wärmestrahlung in eine Temperaturinformation der Emissionsgrad des zu untersuchenden Materials benötigt wird. Dieser kann sich jedoch aufgrund von Phasenübergängen oder Oxidationsbildungen während des Prozesses unvorhersehbar ändern, wodurch große Abweichungen zwischen angezeigten und realen Temperaturen entstehen können.

Das in dieser Arbeit gewählte Prinzip der Quotientenpyrometrie verringert diese Messunsicherheiten, indem sie die spektralen Strahldichten zweier Wellenlängenbereiche miteinander ins Verhältnis setzt und hierdurch den Einfluss der Größenvariation der abstrahlenden Fläche sowie der Emissionsgradänderung verringert bzw. kompensiert. Das in dieser Arbeit verwendete Quotientenpyrometer ist eine Neuentwicklung, da kommerziell angebotene Quotientenpyrometer aufgrund des einige hundert Mikrometer großen Messflekbereichs für Anwendungen innerhalb der Mikrotechnik ungeeignet sind. Die technischen Daten des Pyrometers können der Tabelle 10 entnommen werden.

Tabelle 10: Technische Daten der verwendeten fasergekoppelten Quotientenpyrometer [103]

Messbereiche	900 - 1500 °C
Wellenlängenbereiche	λ_1 : 1,25 μm ; λ_2 : 1,60 μm
Min. Messfleckdurchmesser	50 μm
Messgenauigkeit	+/- 1 %
Faserdurchmesser	100 μm
Zieleinrichtung	Diodenlaser (λ = 635-670 nm)

Die Integration der Messtechnik in die Versuchstechnik erfolgt durch einen halbdurchlässigen Spiegel (Abbildung 24, 3. Umlenkspiegel), welcher hochreflektierend für die Wellenlänge der Laserstrahlung und hochtransmissiv im Wellenlängenbereich der Pyrometer beschichtet ist. Zur Reduzierung der chromatischen Aberration bei der Verwendung unterschiedlicher Wellenlängen erfolgt die Fokussierung der vom Spiegel transmittierten Wärmestrahlung auf den Fasereintritt durch eine achromatische Linse, wodurch Farbfehler des Bildes verringert werden. Dies wird durch Verwendung von zwei Linsen aus unterschiedlichem Glas erreicht. Die Glaskombination wird hierbei so gewählt, dass die beiden interessierenden Wellenlängen im Brennpunkt zusammentreffen, wodurch zugleich die restliche Aberration auf ein Minimum reduziert wird. Die Grobjustage des Pyrometermessflecks erfolgt über einen Positionierlaser, der in die Faser des Pyrometers eingekoppelt und durch Mikrometerschrauben positioniert werden kann. Die Feinjustage erfolgt mittels Pinholes mit integrierter Wärmequelle mit unterschiedlichen Durchmessern (20 μm , 50 μm , 100 μm), die zur Ermittlung des kleinsten Messfleckdurchmessers durch die unterschiedlichen Ebenen gefahren werden.

Die Verarbeitung der vom Pyrometer gelieferten analogen Signale erfolgt durch eine Regelungssoftware, die in der Programmiersprache C++ erstellt worden ist und unter dem Betriebssystem Microsoft WINDOWS einen Regelbetrieb in Echtzeit ermöglicht. Das Programm liest die vom Quotientenpyrometer ermittelten Werte ein und bereitet diese mit Hilfe von mathematischen Funktionen auf. Ein PID-Regelalgorithmus berechnet einen geeigneten Stellwert, der an die Laserstrahlquelle geleitet wird und zur Einstellung der Laserstrahlleistung dient. Neben der Abstimmung der P-, I- und D-Anteile des Reglers zur einwandfreien Prozessführung sind in der Software mathematisch definierte Entscheidungsmerkmale wie z. B. Signalgrenzen aktivierbar, die einem erfolgreichen Regelungsverlauf dienen. Alle Prozessparameter und Prozesssignale werden gespeichert und nach Prozessende auf einen Datenträger geschrieben. Damit ist sowohl eine Offline-

Auswertung zur Prozessoptimierung als auch eine Protokollmöglichkeit im Rahmen der Qualitätssicherung möglich. Neben dem beschriebenen Regelbetrieb ermöglicht die Software auch eine reine Temperaturlaufzeichnung.

Tabelle 11: Technische Daten zur Temperaturregelungssoftware [104]

Regeltakt und Messrate	2 kHz bei Pentium Athlon 900 MHz
Signalaufösung	12 bit im Bereich -10 V bis +10 V
Signalaufbereitung	Optional: <ul style="list-style-type: none"> • Mittelwertbildung • Tiefpassfilter
Regelalgorithmus	PID
Signalausgang (Stellsignal zum Laser)	0-10 V (beliebig veränderbar)
Echtzeitdarstellung von	<ul style="list-style-type: none"> • Prozesstemperatur • Laser-Stellsignal • Soll – Ist – Abweichung
Datensicherung	ASCII-Speicherung von: <ul style="list-style-type: none"> • Zeit • Temperatur • Soll – Ist – Abweichung • Stellsignal • Reglerparameter

6.2 Zusatzwerkstofftransport und -fokussierung (HB-2)

Voraussetzung zur Herstellung von Mikrostrukturen ist die Verwendung von entsprechend kleinen Zusatzwerkstofffraktionen mit Partikeldurchmessern kleiner 15 µm. Als besonders problematisch bei der Partikelförderung dieser Partikelgrößen stellt sich hierbei die Agglomerationsneigung dar, die sich häufig in Form von Brückenbildungen über Austrittsöffnungen konventioneller Pulverförderer äußert. Hierdurch ist die Verwendung von konventionellen Pulverförderern für die im Rahmen dieser Arbeit verarbeiteten Korngrößen ausgeschlossen. Aus diesem Grund ist ein Pulverförderkonzept entwickelt worden, welches zwei für die Förderung von Mikropartikeln bereits bewährte Förderprinzipien kombiniert bzw. erweitert. Bei den gewählten Prinzipien handelt es sich um eine Anpas-

sung des bereits in der Aerosoltechnik verwendeten Bürstenförderers [105,106] und um das Prinzip der Pulverförderung unter Zuhilfenahme von Ultraschallanregung [107].

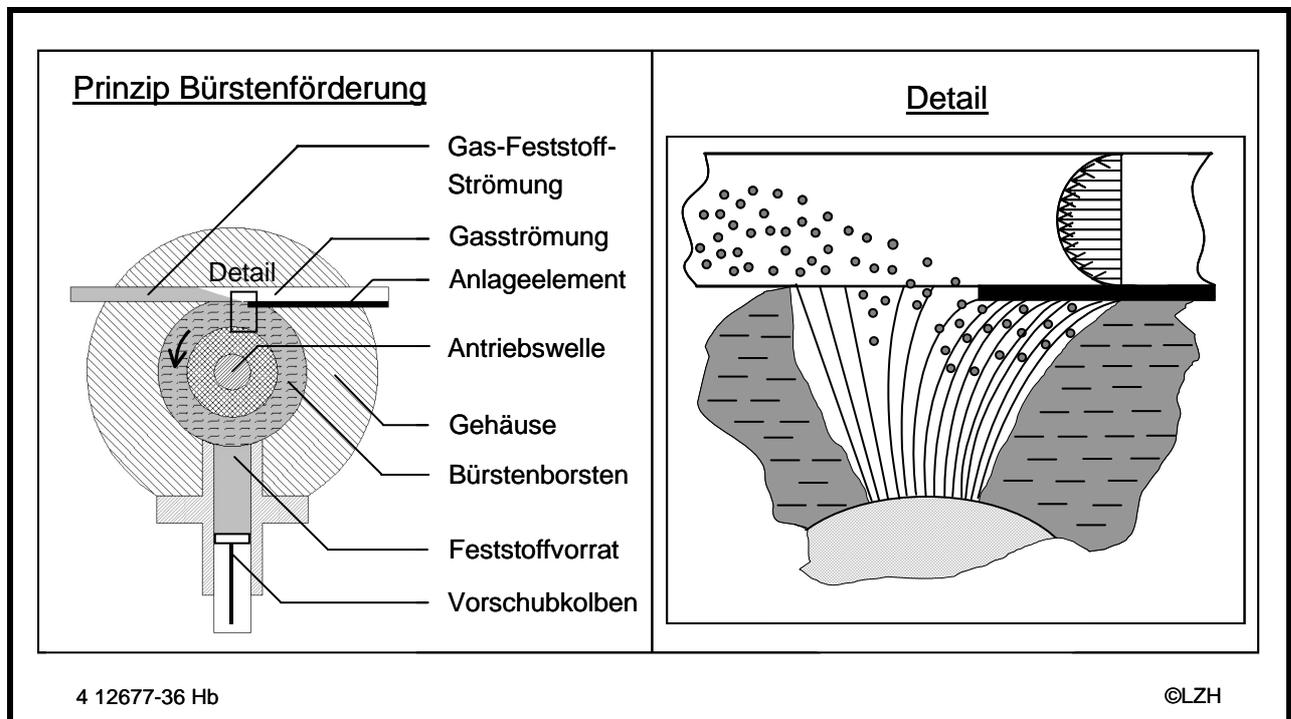


Abbildung 25: Weiterentwicklung des Bürstenförderprinzips

Im Gegensatz zur kommerziell erhältlichen Variante des Bürstenförderers, die zum Austragen der von der Bürste aufgenommenen Partikel einen Trägergasstrom hoher Strömungsgeschwindigkeit benutzt, verwendet die in der Abbildung 25 dargestellte Variante mechanische Mittel zum Austragen der Partikel. Hierzu wird ein Anlageelement benutzt, welches an der Umfangsfläche der Bürste anliegt. Beim Verlassen des Anlageelements federn die Bürstenborsten aufgrund ihrer Elastizität in die ursprüngliche Stellung zurück und beschleunigen damit die Partikel aus der Bürste heraus. Die herausgeschleuderten Partikel werden dann von einem Trägergasstrom niedriger Geschwindigkeit aufgenommen und einer Hauptzufuhrleitung zugeführt. Diese mündet in einen Pulververteiler, der den Pulverhauptstrom in sechs gleichmäßige Pulvernebenströme aufteilt. Die Nebenströme münden in einer Düse, die den Pulverstrom coaxial um den Laserstrahl fokussiert. Die Düse besitzt einen verstellbaren Innenkegel, dessen Geometrie der im Abschnitt 6.1.1.3 vermessenen und dargestellten Strahlgeometrie entspricht. Das zwischen dem Innen- und Außenkegel einstellbare Spaltmaß beträgt 0 – 500 μm . Die Düse ist zum Schutz der Optik mit einem Schutzglas ausgestattet und kann in der z-Ebene entsprechend dem gewünschten Arbeitspunkt beliebig eingestellt werden. Zur Aufrechterhaltung eines konstanten Pulvermassenstromes und zur Vermeidung von Anlagerungen ist ein

Ultraschallprozessor integriert worden. Dieser erzeugt longitudinale mechanische Schwingungen mit einer Frequenz von 40 kHz. An den Schallwandler angeschraubte Sonotroden verstärken die vertikalen Schwingungen und übertragen die Ultraschallenergie über ihre Stirnfläche an den Pulververteiler, über welchen schließlich das gesamte System in Schwingungen versetzt wird.

Tabelle 12: Technische Daten Ultraschallprozessor

Arbeitsfrequenz	40 kHz
Regelbereich	+/- 1 kHz
Max. Amplitude	Ca. 250 μm

6.3 Peripheriekomponenten (HB-3)

6.3.1 Handhabungssystem

Die in der Arbeit verwendete Positioniereinheit besteht aus Standardkomponenten und beinhaltet eine x-, y-, z- Verfahreinheit sowie eine Drehachse, die optional auf eine der genannten Achsen montiert werden kann. Die Führungsgenauigkeiten der translatorischen Achsen werden vom Hersteller mit einem maximalen Höhengschlag von zwei Mikrometern und einem maximalen Seitenschlag von vier Mikrometern angegeben. Der Wiederholungsfehler wird ohne Last auf kleiner gleich zwei Mikrometer festgesetzt. Die angegebenen Daten beziehen sich jeweils auf den Gesamthubweg, der innerhalb der x-, y-Achse auf 100 mm und innerhalb der z-Achse auf 50 mm festgesetzt worden sind.

Innerhalb der rotatorischen Achse liegt der Rundlauf kleiner fünf Mikrometer und der Planlauf kleiner 15 Mikrometer. Der Wiederholungsfehler wird mit +/- 0,01° angegeben. An der Drehachse ist an einem Kragbalken der Substrathalter angebracht. Dieser dient zur Aufnahme der Substrate mit den Dimensionen 20 x 20 x 4 mm³. Der Substrathalter ist mit einer Vorwärmung ausgestattet, die es erlaubt, das Substrat temperaturgeregelt über Wärmeleitung bis zu einer maximalen Vorwärmtemperatur von 400 °C aufzuheizen.

6.3.2 Integration eines Restsauerstoffmessgerätes

Zur Überprüfung der Schutzgasatmosphäre innerhalb der Prozessumgebung ist ein Sauerstoff-Messsystem integriert. Dieses Messgerät dient zur kontinuierlichen Messung der Sauerstoffkonzentrationen in der inneren Schutzgaskammer. Hierzu wird kontinuierlich

ein Gasstrom aus der Kammer entnommen und dem Messgerät zur Auswertung zugeführt. Die technischen Daten können der

Tabelle 13 entnommen werden.

Tabelle 13: Technische Daten Schutzgasmessgerät [108]

Messbereich	0 - 20,6 Vol.-% (höchste Auflösung 0,1 Vol.-ppm)
Messgenauigkeit bei Normaldruck	Rel. Messfehler < 5% +/- 5 ppm
Messgasdurchsatz	5 bis 10 l/h

6.3.3 Auslegung der Schutzgaskammer

Bei der Auslegung der Prozesskammer ist besonderer Wert auf eine weitestgehend sauerstofffreie Schutzgasatmosphäre gelegt worden, welche bei der Verwendung von kleinen Partikeldurchmessern aufgrund der größeren Oberflächen von besonderer Bedeutung ist. Das Konzept einer Kapselung und Flutung der näheren Prozessumgebung erwies sich im Laufe der Untersuchungen als nicht ausreichend, weil es durch verbleibende Sauerstoffnester zu Oxidbildungen innerhalb der Schweißungen kam. Erst eine Kapselung der direkten Prozessumgebung mit entsprechender Vorflutungszeit führte zu befriedigenden Sauerstoffgehalten (vgl. Abbildung 26). Die Kapselung besteht im wesentlichen aus einem oberen Messingabschluss, der fest mit der koaxialen Pulverzufuhrdüse verbunden ist. Auf diesem Abschluss befindet sich eine Teflonscheibe, die mit einer weiteren Tefloneinheit verschraubt wird, wodurch der obere Messingabschluss umschlossen wird. Die untere Tefloneinheit ist so ausgelegt, dass diese in einen unteren Messingabschluss eingreift, der auf dem Substrathalter befestigt ist (vgl. Abbildung 26). Aufgrund der Gleiteigenschaften des Teflons ist es möglich, den Substrathalter sowohl in der x-, y-Ebene als auch in der z-Ebene in die gewünschte Position zu fahren, ohne dass es zu einer Behinderung des Verfahrenablaufes kommt. Die Auslegung der Tefloneinheiten ist so gewählt, dass alle beliebigen Positionen auf dem Substrat angefahren werden können.

Zur Verdeutlichung sind in der Abbildung 26 die Sauerstoffgehalte der äußeren und inneren Schutzgaskammer in Abhängigkeit der Vorflutzeit dargestellt. Aus den Verläufen wird deutlich, dass bei Verwendung der äußeren Kammer die Sauerstoffgehalte auch nach einer entsprechenden Vorflutzeit im vierstelligen ppm-Bereich liegen. Verwendet man hingegen die innere Schutzgaskammer, so liegen die Werte bei vergleichbarer Vorflutzeit lediglich im zweistelligen ppm-Bereich.

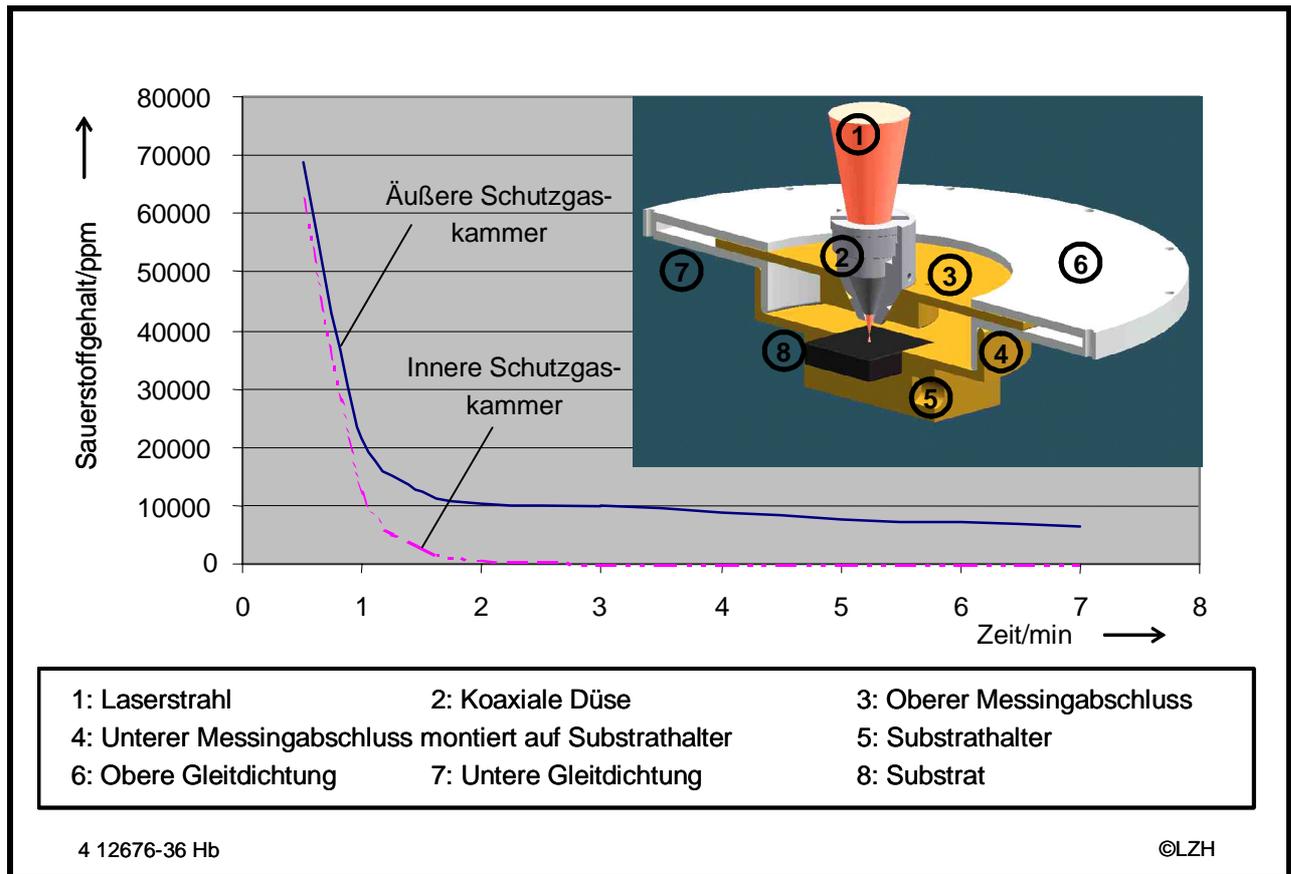


Abbildung 26: Darstellung der inneren Schutzgaskammer und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit der Vorflutzeit

6.3.4 Integration einer Abstandssensorik

Bei der Herstellung von dreidimensionalen Geometrien sind die Zustellhöhen der Einzelbahnen von essenzieller Bedeutung, da es bei Fehlpositionierungen unweigerlich zu Strahlagefehlern auf den bereits erzeugten Geometrien kommt.

Tabelle 14: Technische Daten Abstandssensorik [109]

Messabstand	4,5 mm
Messbereich	0,3 mm
Messgenauigkeit / Auflösung	0,1 μm / 0,01 μm
Messwinkel zur Objektfläche	90° +/- 30°

Zur Kompensierung dieser möglichen Fehlerquelle ist eine offaxiale Abstandssensorik in die äußere Schutzgaskammer integriert worden, die eine berührungslose Messung von Abstand, Schichtdicke oder Oberflächenrauheit ermöglicht. Das Messverfahren beruht darauf, dass weißes Licht einer Halogenlampe auf die Oberfläche fokussiert und die spektrale Verteilung des reflektierten Lichtes analysiert wird.

6.3.5 Integration eines Strahlvermessungssystems

Zur regelmäßigen Überprüfung der Strahlqualität und der Strahlabmessungen ist ein Strahlvermessungssystem optional in die äußere Schutzgaskammer integriert worden. Dieses System ist auf eine weitere x-, y-, z-Verfahreinheit montiert, die es ermöglicht, in Mikrometerauflösung unterschiedliche zu vermessende Positionen des Laserstrahls anzufahren. Das Messprinzip basiert auf der Schlitz- bzw. Messerkanten-Strahlanalyse. Mit diesem System ist bereits neben den Arbeiten zur Charakterisierung des Roh- und fokussierten Strahls auch die Qualifizierung der entwickelten optischen Bank durchgeführt worden. Die Einheit dient neben der Qualitätssicherung auch zur genauen Überprüfung und Festlegung des Arbeitspunktes für die Auftragschweißungen.

Tabelle 15: Technische Daten des Strahlvermessungssystems [110]

Messprinzip	Schlitz- bzw. Messerkanten-Strahlanalyse nach ISO 11146
Messbereich Strahldurchmesser	0,5 bis 1500 μm
Messauflösung	0,2 % vom Strahldurchmesser
Messgenauigkeit	+/- < 0,5 μm +/- < 2% vom Strahldurchmesser

6.3.6 Integration eines Miniaturmikroskops

Durch die Integration eines Miniaturmikroskops mit einer Auflösung von 537 x 597 Pixel und einer stufenlosen Vergrößerung von 0,1 bis 450 in die äußere Schutzgaskammer ist es möglich, einen ersten visuellen Eindruck der bearbeiteten Zone zu gewinnen. Besonderer Vorteil hierbei ist, dass die Schweißungen vermessen werden können, ohne dass die Probe entfernt werden muss, was zwangsläufig zum Verlust des Arbeitspunktes führen würde.[111]

6.4 Automatisierung (HB-4)

Die Steuerung und Regelung der erläuterten Peripheriekomponenten erfolgt durch ein PXI-System (PCI eXtensions for Instrumentation) der Firma National Instruments. Hinter der Bezeichnung PXI verbirgt sich eine Technologie, welche die bestehenden PCI- bzw. CompactPCI-Standards mit den erweiterten Anforderungen an messtechnische Systeme verbindet und hierdurch die Lücke zwischen der klassischen PC-Messtechnik und dem High-End-VXI-Bereich schließt (VXI: VMEbus eXtensions for Instrumentation). Als Erweiterung zur PCI- bzw. Compact PCI-Spezifikation definiert PXI zusätzliche Bereiche wie z. B. Umgebungsbedingungen und mechanische Erweiterungen, welche für den industriellen Einsatz von großer Bedeutung sind. Die PXI-Module sind als Einsteckkarten ausgeführt und besitzen keine Anzeigen und Bedienelemente. Die Einsteckkarten werden in ein PXI-Chassis eingesteckt, welches in der Regel bis maximal acht Module aufnehmen kann. Durch die Verwendung eines PXI erhält man größtmögliche Flexibilität, da die Module aus den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen stammen können. Die Bandbreite reicht von klassischen GPIB- und Multifunktionskarten über die Ankopplung von VXI-Systemen bis hin zu Bilderfassungseinheiten und CAN-Bussystemen. Hierdurch ist eine modulare Bus-Architektur für ein breites Spektrum PC-basierender Anwendungen verfügbar, wozu die unterschiedlichsten Applikationen in der Mess- und Steuerungstechnik sowie Anwendungen im Bereich der Prozessüberwachung und Automation zählen. Die Programmierung zur Steuerung und Regelung der Anlage erfolgte mit Labview 6.1.

Tabelle 16: Technische Daten des verwendeten PXI-Systems

Prozessor	INTEL Celeron
Taktfrequenz	566 MHz
Cache	128 KB
Arbeitsspeicher	128 MB SDRAM 133 MHz
Einsteckkarten	
Multi I/O-Karte (2x)	Je 16/2 analoge Ein-/ausgänge Je 32 digitale Ein-/Ausgänge
Serielle Schnittstellenkarte	8 RS 232 Ports
Serielle Schnittstellenkarte	8 RS 485/422 Ports
High speed Analog Ausgangskarten	4 analoge Ausgänge 8 digitale Ein-/Ausgänge

7 Versuchswerkstoffe und Versuchsdurchführung

7.1 Substrat- und Zusatzwerkstoff

Als Substrat- und Zusatzwerkstoff ist ein nichtrostender CrNi-Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von max. 0,03 % eingesetzt worden, der sich durch eine gute Korrosionsbeständigkeit, Verarbeitbarkeit und Schweißbarkeit auszeichnet. Der Werkstoff ist bereits im DMLS-Verfahren erfolgreich eingesetzt worden und weist die in der Tabelle 17 gezeigte Zusammensetzung auf.

Tabelle 17: Zusammensetzung von Substrat- und Zusatzwerkstoff

Stoffnummer	Kurzname	Analyse							
		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %
1.4404	X 2 CrNiMo 17 13 2	<0,03	1,0	2,0	0,045	0,03	16,5- 18,5	2,0-2,5	11,0- 14,0

Die Partikelgrößenverteilung des Zusatzwerkstoffes ist mit einem Partikelgrößenmessgerät der Firma CILAS, Typ CILAS 920, durchgeführt worden. Das hierbei verwendete physikalische Messprinzip ist die Laser Diffraction, bei der die Beugung des Laserlichtes am Partikel aufgenommen und ausgewertet wird. Abbildung 27 stellt die aus mehreren Wiederholungsmessungen ermittelte Partikelgrößenverteilung dar. Die Verteilung zeigt im Bereich von 2 µm bis 11 µm eine gute Approximierung des Partikeldurchmessers an eine Gaußverteilung, der mittlere Partikeldurchmesser beträgt 6,88 µm. Der Zusatzwerkstoff ist durch Verdüsen hergestellt worden, wodurch sich der hohe Grad an Kugelförmigkeit der Partikel erklärt.

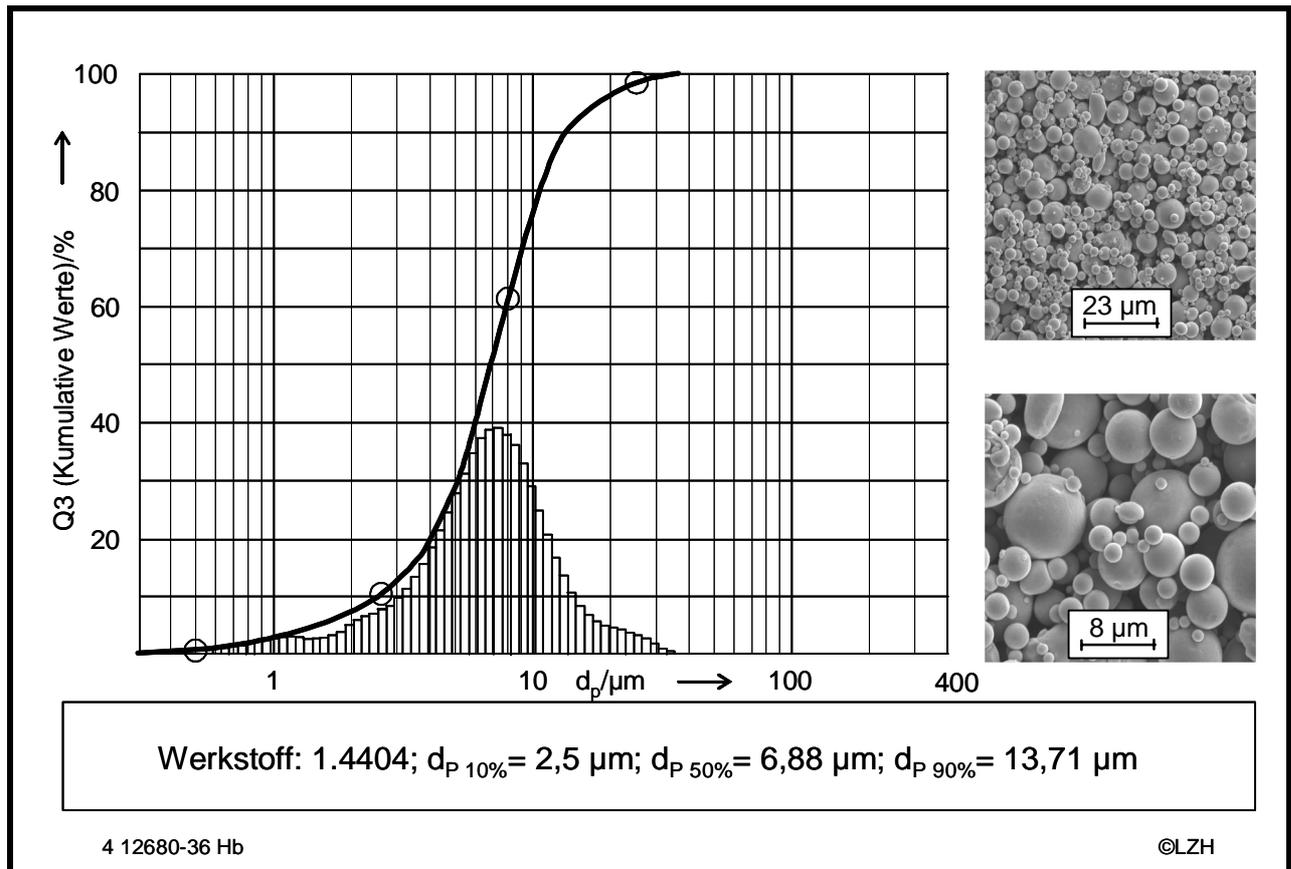


Abbildung 27: Partikelgrößenverteilung und REM-Aufnahme des Zusatzwerkstoffes

7.2 Prozessgase

Während der Untersuchungen kommen als Prozess- bzw. Schutzgase Argon und Helium zum Einsatz, deren Spezifikationen in der Tabelle 18 aufgeführt sind. Die Eigenschaften der Prozessgasverwendung lassen sich für das 3D-Mikro-Auftragschweißen unter zwei Aspekten charakterisieren: Zum einen werden durch die lokal vorhandene Schutzgasatmosphäre unerwünschte Reaktionen der metallischen Schmelze mit der Umgebung (z. B. Oxidation, Nitrierung) vermieden, zum anderen dienen die Prozessgase dem Transport von Zusatzwerkstoffen zum Bereich der Strahl-Substrat-Wechselwirkungszone. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist eine erhebliche Beeinflussung der Strahl-Stoff-Wechselwirkung und damit der Prozessstabilität und -effektivität.[112,113]

Tabelle 18: Eingesetzte Prozessgase

Gasart		Argon	Helium	
		4.6	4.6	
Reinheit	Vol-%	> 99,996	> 99,996	
Nebenbestandteile	vpm			
	O ₂	< 4	< 2	
	N ₂	< 10	< 3	
	H ₂ O	< 5	< 3	
	C _n H _m	n.a.	< 0,2	
Dichte bei 0 °C; 101325 MPa	kg/m ³	1,7839	0,17847	
Molare Masse	g/mol	39,948	4,003	
Wärmeleitfähigkeit	mW/Km	20 °C	17,7	152
		8000 °C	1428,6	7773,9
Spez. Wärmekapazität	kJ/kgK	20 °C	0,521	5,2
Ionisierungsenergie	eV	16	24,5	

Insbesondere durch die Verwendung einer inneren und äußeren Schutzgaskammer sind unterschiedliche Strategien hinsichtlich des verwendeten Schutzgases durchgeführt worden. Als Transportmedium der pulverförmigen Zusatzwerkstoffe ist ausschließlich Argon verwendet worden.

7.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist weitestgehend automatisiert und setzt sich vor Prozessbeginn aus den in der Abbildung 28 dargestellten Schritten zusammen: Nach Aktivierung der Spannungsversorgung werden die für einen Schweißvorgang wichtigen Ausgangszustände angefahren und überprüft. Im Fall des Laseraggregates bedeutet dies zunächst ein Anschalten der Kühlung sowie die Aktivierung der Sicherheitssignale am Aggregat. Nach Sicherstellung eines entsprechenden Kühlmitteldurchflusses erfolgt das Einschalten des Aggregates. Da das Aggregat zunächst auf Betriebstemperatur gebracht werden muss, erfolgt nach vorgegebener Zeit eine Leistungsmessung, bei der die Isttemperatur mit vorher hinterlegten Solltemperaturen verglichen wird. Im Fall der Übereinstimmung erfolgt die Freigabe für den eigentlichen Prozess an eine Schnittstelle des für die Bewegungsausführung verantwortlichen Rechners.

Innerhalb der Prozesskammer erfolgt der Vorwärmvorgang für das Substrat und die Sicherstellung einer ausreichenden Schutzgasatmosphäre. Bei Aktivierung der Substrat-

vorwärmung wird das Substrat auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt und durch einen Temperaturfühler überwacht. Stimmen die Solltemperatur und die Isttemperatur über einen längeren zu definierenden Zeitraum überein, erfolgt auch hier eine separate Freigabe für kommende Signalverläufe. Wie bereits im Kapitel 6.3 angedeutet, hat die Qualität der Schutzgasatmosphäre einen signifikanten Einfluss auf das Schweißergebnis. Aus diesem Grund erfolgt vor dem eigentlichen Prozessbeginn ein Fluten der inneren Prozesskammer mit dem ausgewählten Inertgas bis zu einem vorgegebenen Sollwert, der ebenfalls ständig mit dem Istwert abgeglichen wird. Bei Erreichen des Sollwertes erfolgt auch in diesem Fall die Freigabe für die weiteren Prozessverläufe.

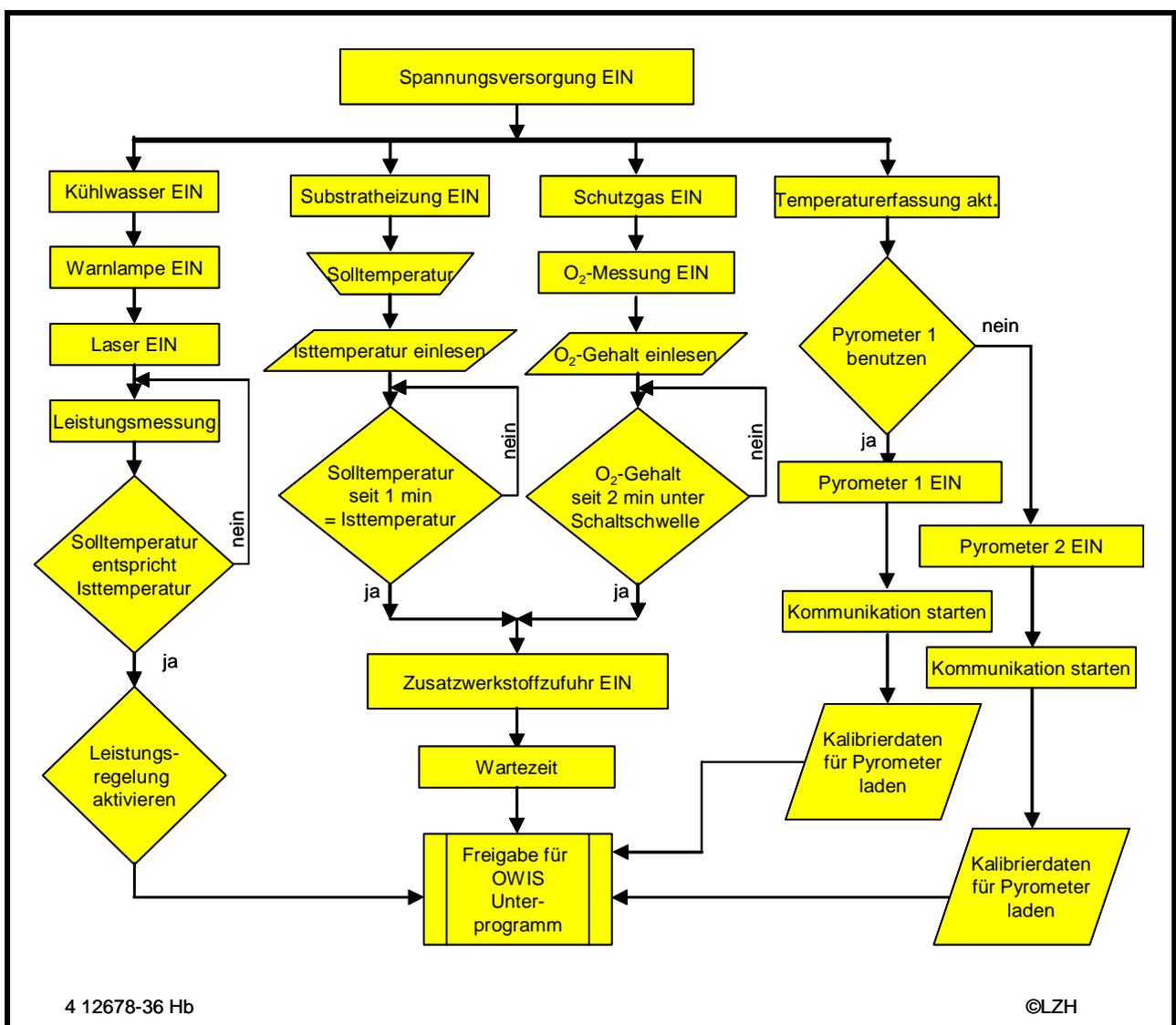


Abbildung 28: Programmablaufplan vor Prozessbeginn

Parallel zu den beschriebenen Programmabläufen erfolgt die Aktivierung der Temperaturerfassung. Abhängig von den definierten Temperaturbereichen erfolgt eine Auswahl der

zur Verfügung stehenden Pyrometer. Im Anschluss daran werden die Kalibrierdaten des entsprechenden Pyrometers geladen und durch ein Freigabesignal bestätigt.

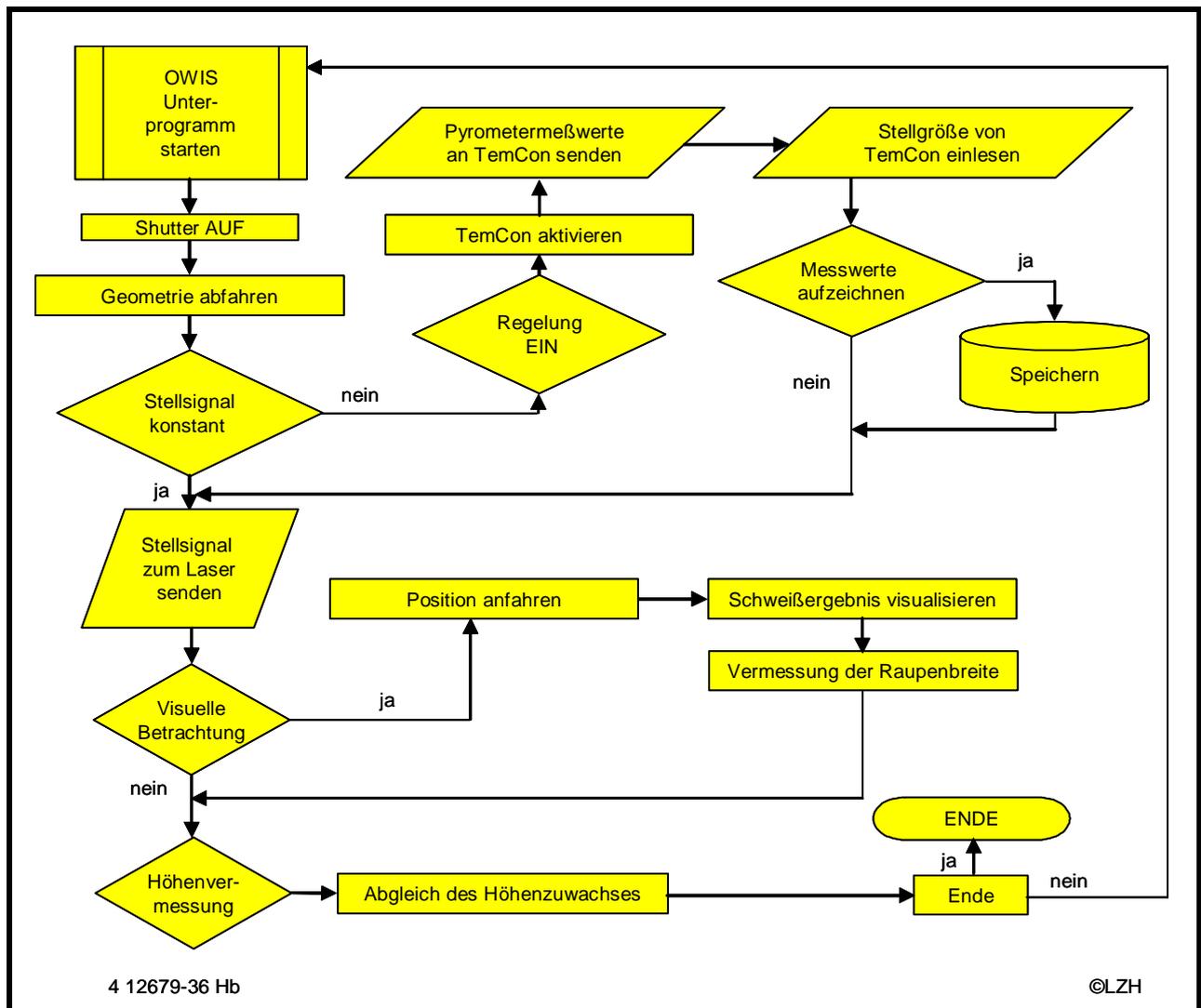


Abbildung 29: Programmablauf beim Schweißprozess und darauffolgender Beurteilung

Bei Komplettierung aller hinterlegten relevanten Freigabesignale wird der eigentliche zur Bearbeitung notwendige Programmablauf nach Bestätigung gestartet. Hierzu wird ein Unterprogramm in dem separaten Rechner für die Handhabung gestartet, in welchem die Start- und Stoppsignale sowie die Geometrieinformationen hinterlegt sind. Bei Aktivierung des Programms erfolgt das Abfahren der zu schweißenden Geometrie, wahlweise mit einer reinen Temperaturerfassung oder im Regelmodus. Im letzteren Fall wird ein Temperaturregelbereich in der Regelsoftware TemCon hinterlegt, der die Laserleistung entsprechend der gemessenen Temperatur reguliert. Bei Bedarf können die gemessenen Werte sowie das Laserstellsignal für weitere Analysen gespeichert werden. Nach Beendigung des Schweißvorganges wird eine Position angefahren, die eine erste visuelle Beur-

teilung der Schweißung erlaubt. Eine weitere fixierte Position erlaubt die Vermessung der Probe hinsichtlich ihrer lateralen und vertikalen Ausdehnung und ermöglicht hierdurch die Korrektur für darauffolgende Schweißungen. Zur Verdeutlichung ist der Programmablauf in Abbildung 29 dargestellt.

8 Ergebnisse und Diskussion

8.1 Schweißergebnisse und Beurteilung der Schweißnahteigenschaften

Nach den umfangreichen Qualifizierungsuntersuchungen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit der Einzelkomponenten, die in Kapitel 6 dargestellt wurden, erfolgen nun grundlegende Untersuchungen. Diese zeigen zum einen das Potential der neuen Anlagentechnik auf und verdeutlichen zum anderen aber auch Verbesserungspotentiale, welche bei der Qualifizierung der Einzelkomponenten nicht in Erscheinung getreten sind. Zu diesem Zweck werden zunächst Einzelbahnen erzeugt und deren Querschliffe an unterschiedlichen Orten entlang der Schweißbahn lichtmikroskopisch untersucht. Exemplarisch für diese Untersuchungen sind in der Abbildung 30 drei Schliffbilder abgebildet, die den Anfangsbereich der jeweilig erzeugten Schweißbahn darstellen.

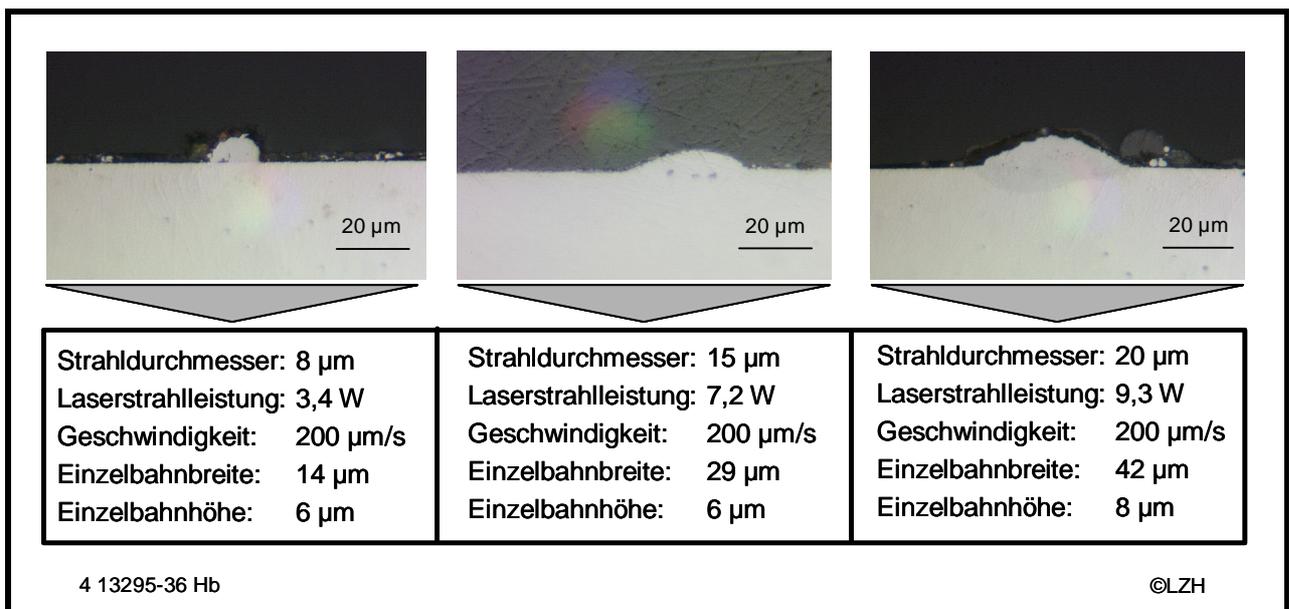


Abbildung 30: Querschliffe von Einzelbahnen unterschiedlicher vertikaler Zustellungen im Anfangsbereich der Schweißnaht

Unter Beibehaltung einer weitestgehend konstanten Leistungsdichte und Streckenenergie sind ausgehend vom Laserstrahlfokus (Abbildung 30, links) kompakte rissfreie Bahnen unterschiedlicher Ausdehnung mit guter Anbindung an das Substrat hergestellt worden. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang sind die im Laserstrahlfokus erreichten Schweißbahnabmessungen mit einer Schweißbahnbreite unter 20 µm, welche die Erwartungen hinsichtlich der erreichbaren Auflösungen mit der entwickelten Anlage noch übertreffen.

Wird der weitere Verlauf der Schweißbahn betrachtet, so ergeben sich jedoch eklatante Unterschiede im Vergleich zu den Nahteigenschaften im Anfangsbereich der betrachteten Schweißbahn.

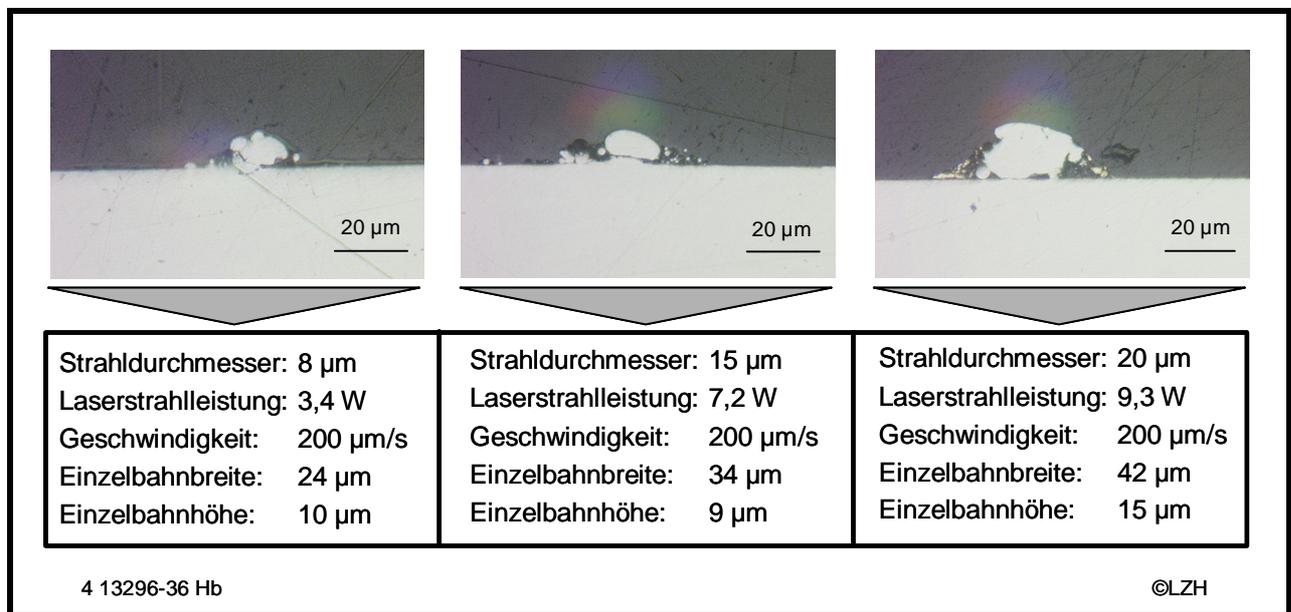


Abbildung 31: Querschliffe von Einzelbahnen unterschiedlicher vertikaler Zustellungen im Verlauf der Schweißnaht

In der Abbildung 31 sind die Querschliffe der Abbildung 30 im weiteren Verlauf der Naht nach circa vier Millimetern dargestellt. Die Abbildung dokumentiert, dass die ursprünglich vorhandene kompakte Form mehreren nicht vollständig schmelzmetallurgisch verbundenen Schweißgutgeometrien gewichen ist und hierdurch teilweise erhebliche Porositäten innerhalb der Gesamtgeometrie auftreten. Die Randbereiche dieser Gesamtgeometrie sind durch anhaftende, offensichtlich nicht direkt am Prozess beteiligte Partikelkollektive teilweise diffus und weisen nicht die für Auftragschweißungen charakteristische Linsengeometrie auf. In allen durchgeführten Versuchen kommt es zu massiven Geometrieänderungen, die sich weder in Richtung einer Einzelbahnverbreiterung noch in einer Einzelbahnerhöhung reproduzieren lassen und sich im weiteren Verlauf der Schweißbahn stetig ändern.

Neben den erläuterten Phänomenen treten sowohl Bindefehler innerhalb des Schweißgutes als auch massive Anbindungsfehler an dem Substrat auf, welches auf eine zu hohe Absorption der Laserstrahlleistung innerhalb des Partikelkollektivs schließen lässt, wodurch eine zu geringe Leistungsdichte auf dem Substrat hervorgerufen wird.

Zur Überprüfung der reproduzierbaren Herstellung der Schweißnahtgeometrie für den Anfangsbereich sind mehrere Einzelbahnen unter Beibehaltung der Versuchsparameter

nebeneinander auf der Substratoberfläche produziert worden. Nach jeder Einzelbahn ist die Schutzgaskammer geöffnet worden, um den Abkühlvorgang des Substrates auf Umgebungstemperatur zu überprüfen. Zusätzlich erfolgt die Reinigung des Substrates sowie dessen Umgebung von nicht am Prozess beteiligten Pulverresten. In Abbildung 32 ist ein exemplarisches Ergebnis für die Reproduzierungsversuche bei leicht defokussiertem Laserstrahl abgebildet. Gezeigt werden fünf Einzelbahnen, die hinsichtlich der Spurbreite und Spurbreite vermessen und grafisch aufgearbeitet worden sind. Zusätzlich zur Beurteilung der Bahnen untereinander ist die Abweichung des Spurbreiten/Längenverhältnisses zum mittleren Spurbreiten/Längenverhältnisses dargestellt.

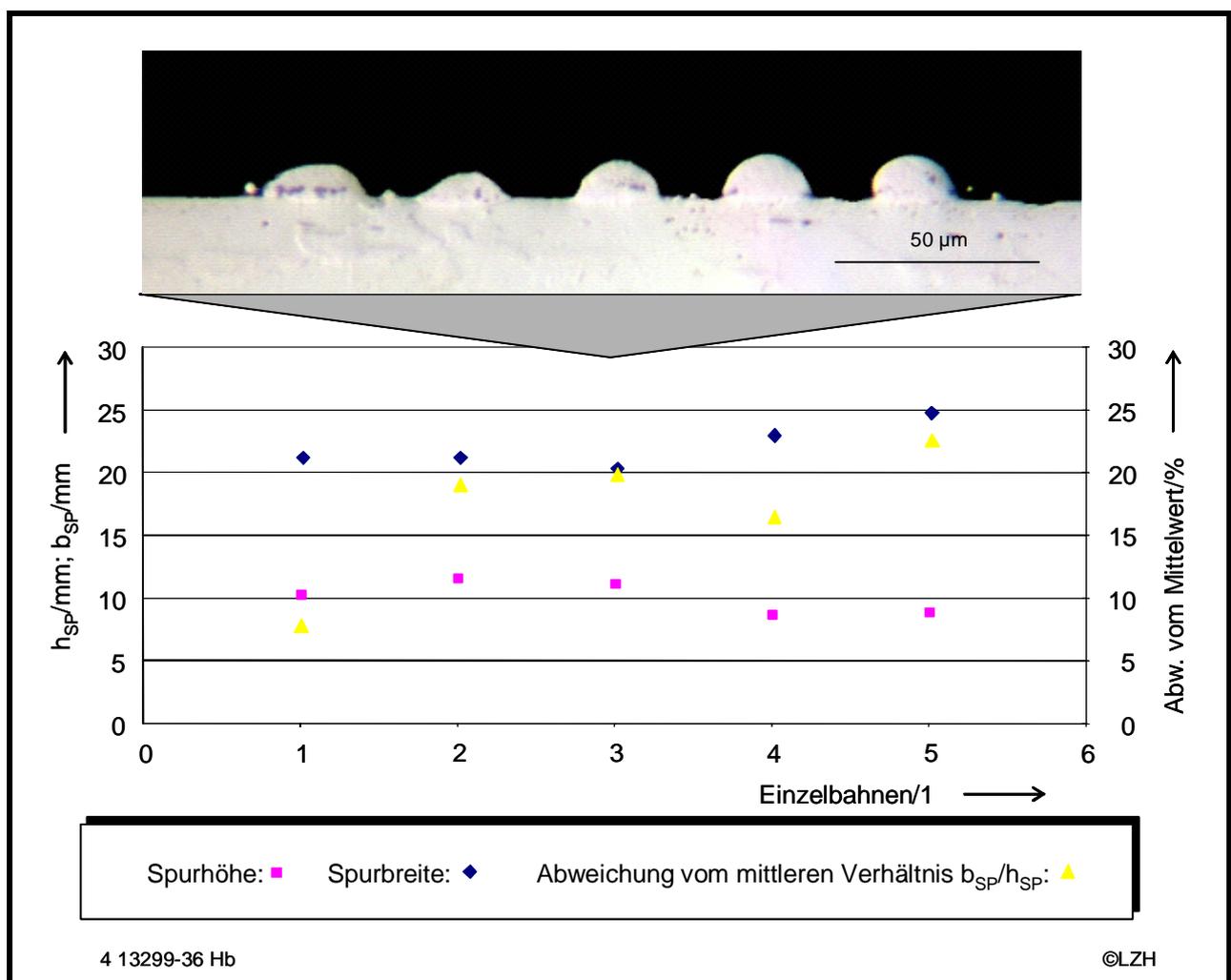


Abbildung 32: Reproduzierbarkeit innerhalb von Einzelbahnen im Anfangsbereich der Schweißnaht

Die Auswertung der Schweißbilder zeigt für die gewählten Einstellungen mit einem defokussierten Laserstrahl von 12 µm Durchmesser einen Mittelwert der Spurbreite von 22,32 µm und eine mittlere Spurbhöhe von 10,18 µm. Die Abweichungen der Einzelbahnen vom

berechneten Mittelwert liegen innerhalb der Spurbreiten bei einer Abweichung von 11 % und innerhalb der Spurbreiten von 14 %. Dies ist auch im Vergleich zu makroskopischen Laserstrahlauftragschweißungen ein durchaus akzeptabler Wert. Der Vergleich des mittleren Spurbreiten/Längenverhältnisses mit dem jeweils in den Einzelbahnen auftretenden Verhältnissen, ergibt höhere Schwankungen im Bereich von 7,6 bis 22,8 %. Neben der Beschreibung der reinen Schweißnahtgeometrie soll an dieser Stelle bereits auf das Auftreten von aufgeschmolzenen, nicht im Schmelzbad abgeschiedenen Partikelkollektiven hingewiesen werden, die sich in Form von Schmelzkugeln in der Nähe der Schweißraupe abscheiden.

Untersuchungen hinsichtlich einer Reproduzierbarkeit der Schweißbahngeometrie auch im hinteren Bereich unter den o. g. Voraussetzungen bestätigten erneut das Auftreten der bereits erwähnten massiven Geometrieänderungen, wodurch Reproduzierungsuntersuchungen als wenig sinnvoll erscheinen.

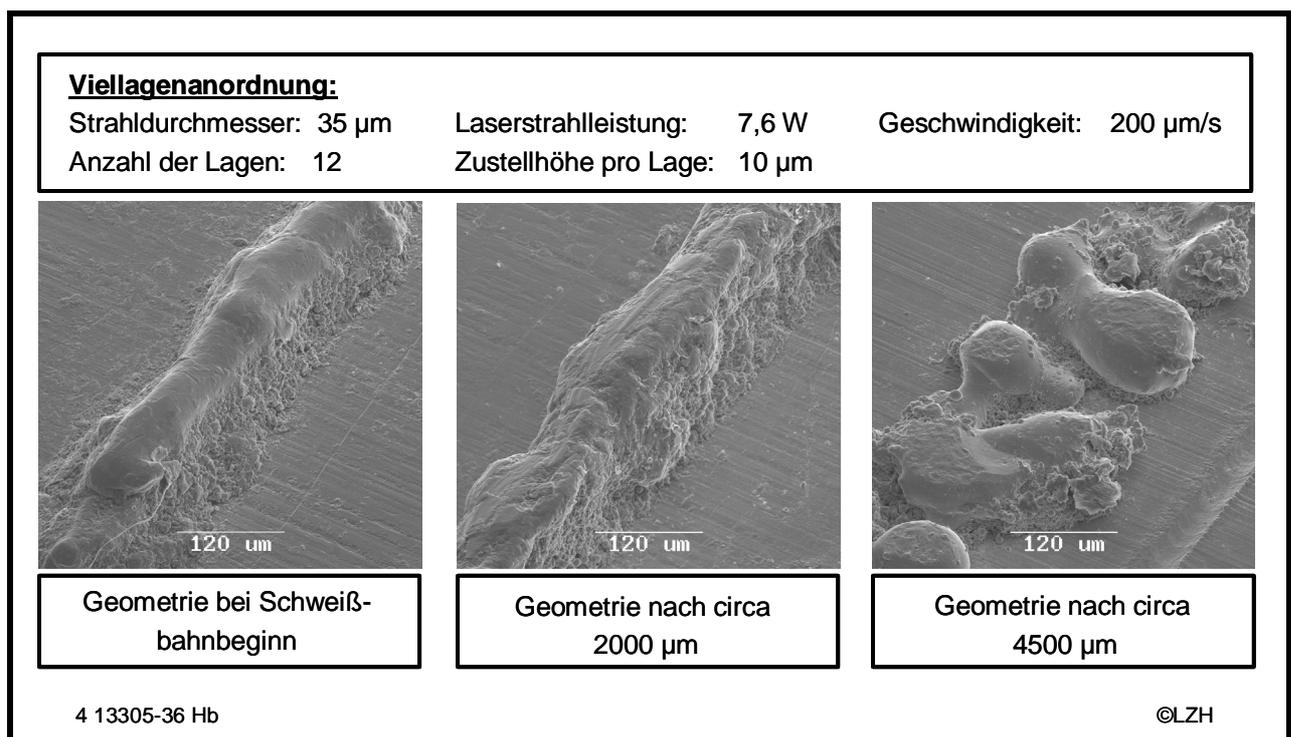


Abbildung 33: REM-Aufnahmen einer Viellagenschweißbahn nach unterschiedlichen Lauflängen

Zur Untersuchung der Auswirkungen der innerhalb der Einzelbahnschweißungen detektierten Phänomene auf einfache Geometriekörper sind Viellagenschweißungen durchgeführt worden. Gegenstand der Untersuchungen ist die Herstellung von Stegen, die durch eine Überlagerung von Einzelbahnen entstehen.

In der Abbildung 33 sind Rasterelektronenmikroskopaufnahmen einer solchen Viellagenschweißung bestehend aus zwölf Einzellagen abgebildet. Hierzu erfolgte zunächst die Auswertung von mehreren Einzelbahnen entsprechender Parameter zur Ermittlung der mittleren Aufbaurate, die für die Viellagenschweißung als vertikale Zustellkomponente für die Zusatzwerkstoffzufuhr genutzt werden kann und zu 10 μm ermittelt worden ist. Gezeigt wird die Draufsicht der Schweißbahngeometrie direkt nach Schweißbeginn sowie nach einer Länge von 2000 und 4500 μm . Im Einvernehmen mit den bisherigen Schweißungen erfolgten auch diese im halbautomatisiertem Betrieb, d. h. es erfolgte nach jeder Einzelbahn ein Öffnen der Schutzgaskammer und eine Entfernung von vorhandenen, nicht am Prozess beteiligten Zusatzwerkstoffresten. Die Aufnahmen zeigen noch deutlicher die bereits innerhalb der Einzelbahnschweißungen auftretenden Defizite im Verlauf der Schweißbahn. Während am Schweißbahnbeginn (vgl. Abbildung 33, linke Darstellung) die ursprünglich aus dem Laserstrahldurchmesser von 35 μm resultierende Schweißbahnbreite bei geschlossener Raupengeometrie an der Oberfläche erhalten geblieben ist, zeigen sich in den Randbereichen bereits verstärkt Partikelablagerungen von teilweise aufgeschmolzenen Partikelkollektiven, die zu einer Auflösung der ursprünglichen Schweißnahtgeometrie führen.

Im weiteren Verlauf der Schweißnaht verstärken sich die beschriebenen Ablagerungen (vgl. Abbildung 33, mittlere Darstellung), so dass die noch im Anfangsbereich der Schweißnaht erkennbare Schweißraupenkontur nur noch ansatzweise zu erkennen ist. Es kommt zu einer wesentlichen Spurverbreiterung, die aus einem Anwachsen der Anlagerungshöhe bis in den Bereich der Schweißoberraupen resultiert.

Im rechten Teil der Abbildung 33 ist die Schweißraupengeometrie nach 4500 μm dargestellt. Die Geometrie zeigt massive Unregelmäßigkeiten, die die ursprünglich gefahrene Kontur eines Einzelsteges nicht mehr erkennen lassen. Es zeigen sich zum Teil eigenständige Materialanhäufungen mit stellenweise erheblichen Verbreiterungen bis zu einem Faktor vier der ursprünglichen Bahnbreite. Neben der beschriebenen Verbreiterung treten Materialunterbrechungen auf, die durch eine mangelnde Anbindung untereinander und zum Teil auch zum Substrat bedingt sind. Der Vergleich der Kontur der Bahn mit denen in der Abbildung 31 zeigt, dass es sich um eine Potenzierung der bereits bei den Einzelbahnen auftretenden, nicht vollständig schmelzmetallurgisch verbundenen Schweißgutgeometrien handelt. Neben der erwähnten Bahnverbreiterung treten bereits hier die genannten erheblichen Porositäten innerhalb der Gesamtgeometrie auf, die sich auch von nachfolgenden Bahnen nicht mehr schließen lassen und auf diese Weise die sichtbaren Anbindungsfehler zwischen den Materialanhäufungen bedingen. Die innerhalb der

Einzelbahnen beobachteten Einzelbahnerhöhungen können bei Viellagenschweißungen allerdings nicht nachgewiesen werden.

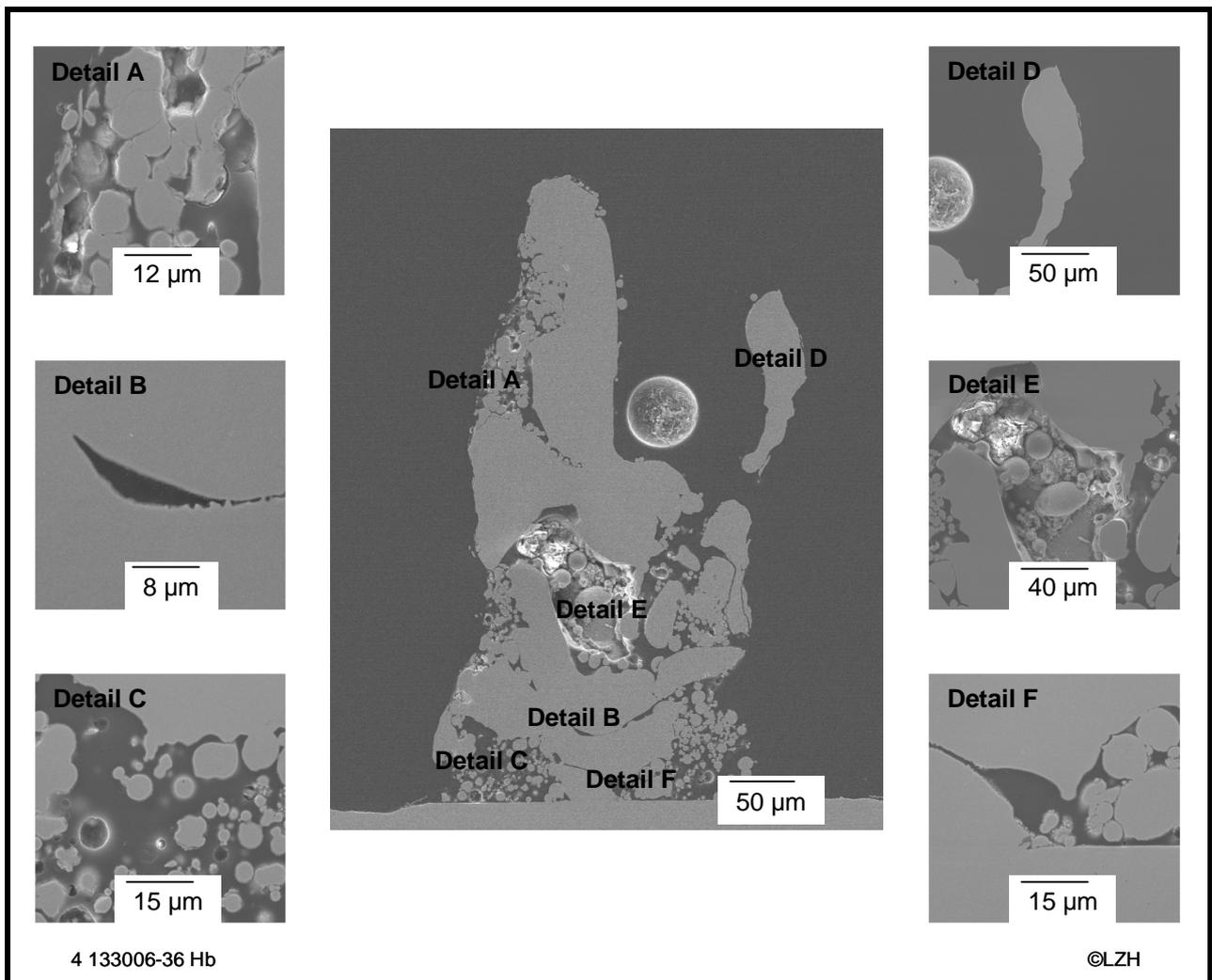


Abbildung 34: Mögliche auftretende Fehlstellenarten

Zur weiteren Verdeutlichung der innerhalb des Verlaufs der Schweißbahn auftretenden Fehlstellen sind diese in der Abbildung 34 anhand einer Rasterelektronenmikroskopaufnahme herausgearbeitet und vergrößert dargestellt worden. Prinzipiell lassen sich die folgenden Fehlstellenarten unterscheiden:

- Detail A: Anhaftungen von im schmelzflüssigen Zustand agglomerierten Einzelpartikeln an die Schweißnahtgeometrie.
- Detail B: Anbindungsfehler zwischen den Einzelbahnlagen.
- Detail C: Anhaftende Partikelkörner im Schweißraupengrund, bestehend aus zum Teil nicht aufgeschmolzenen Originalpartikeln und/oder im schmelzflüssigen Zustand agglomerierten Einzelpartikeln.

- Detail D: Materialbereiche, die nur eine teilweise erst im weiteren Verlauf der Schweißnaht erkennbare Anbindung zur Schweißbahngeometrie besitzen.
- Detail E: Lunkererscheinungen innerhalb der Schweißraupengeometrie.
- Detail F: Fehlende Anbindung von Schweißgut an den Substratwerkstoff.

Als Ursache für die auftretenden Fehlstellenarten, dargestellt im Detail B, D, E und F, kann erneut eine zu hohe Absorption der Laserstrahlung im Partikelkollektiv angenommen werden. Diese führt zu einer zu geringen Leistungsdichte auf dem Substrat bzw. auf den bereits erzeugten Schweißnahtgeometrien und bedingt hierdurch die Fehlstellen.

Zur umfassenden Einschätzung des Verlaufs der Schweißbahngeometrie sind in regelmäßigen Abständen Schliffbilder angefertigt worden. In der Abbildung 35 ist ein Ausschnitt dieser Bilderserie in Abständen von 200 µm dargestellt. Bei der Schweißung handelt es sich, wie bei der Schweißung aus Abbildung 34, um eine im vollautomatisierten Betrieb hergestellte Viellagenbahn, bei der keine visuelle Beurteilung zwischen den Einzelbahnen erfolgte und auch keine Beseitigung vorhandener, nicht am Prozess beteiligter Partikel stattgefunden hat. Aufgrund der Vielzahl der an der Schweißung anhaftenden Zusatzwerkstoffrückstände musste die Probe mechanisch mit einer Bürste gereinigt werden, auch innerhalb der Schutzgaskammer konnten erhebliche Zusatzwerkstoffrückstände festgestellt werden.

Die Aufnahmen zeigen deutlich die erheblichen Geometrieänderungen im Verlauf der Schweißbahn. Beträgt die Schweißraupenbreite zu Beginn der Schweißung in den ersten Lagen noch eine aufgrund des gewählten Laserstrahldurchmessers zu erwartende Raupenbreite, nimmt diese im Verlauf der Naht erheblich zu und verdoppelt sich im Vergleich zur Anfangsbreite im Schweißbahnauslauf. Im weiteren Verlauf des Aufbaus homogenisiert sich die Schweißbahnbreite, so dass sich bereits nach circa 12 Lagen auch im Anfangsbereich der Naht die erwähnte Verdopplung der Schweißnahtbreite einstellt. Als besonderes Phänomen der Schweißraupengeometrie ist das Öffnen und Schließen des Schweißgutes im Verlauf der Schweißnaht zu betrachten, bei der es jeweils etwa in der Mitte der Naht über Zweidrittel der Nahthöhe zu Bereichen ohne Materialdeponierung kommt. Der Grund hierfür könnte in einem durch den unregelmäßigen Aufbau der Einzelbahnen auftretenden Lagefehler des Laserstrahldurchmessers liegen, der zu derart hohen Leistungsdichten auf der Schweißbahn führt, dass es zur Ablation von Teilbereichen kommen kann. Denkbar sind jedoch auch Unregelmäßigkeiten innerhalb der Pulverzufuhr, hervorgerufen z. B. durch Turbulenzen im Fördergas, die entweder einen Mangel an Partikeln im Wechselwirkungsbereich mit der Laserstrahlung vermuten lassen oder jedoch durch zu viele Partikel eine so hohe Absorption im Partikelkollektiv bedingen,

dass es zum Verdampfen des Zusatzmaterials noch vor der Abscheidung auf dem bereits deponierten Schweißgut kommt.

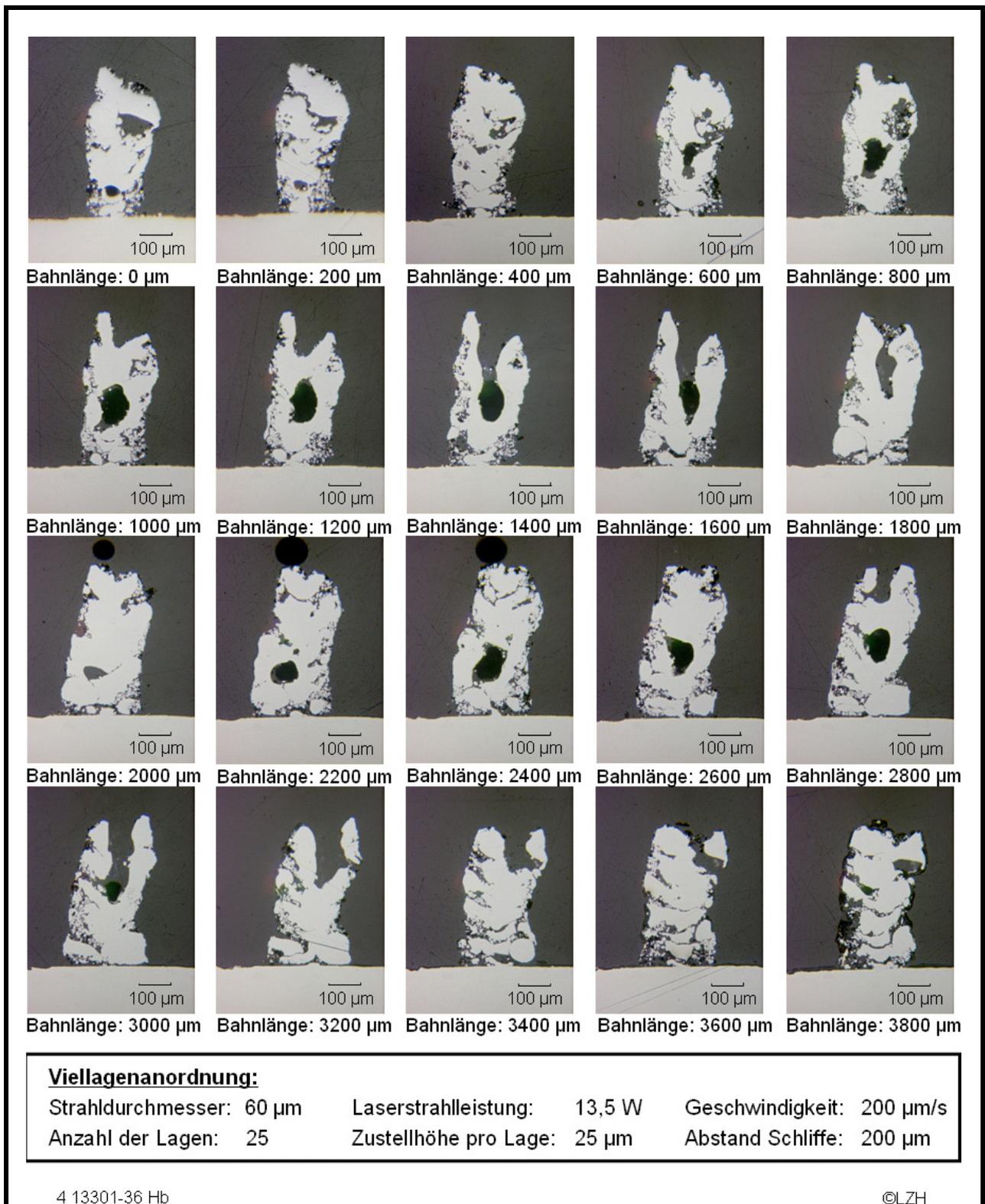


Abbildung 35: Schweißnahtgeometrien im Verlauf der Schweißnaht

Zur Verifizierung der möglichen Gründe werden zunächst die bei den dargestellten Versuchen relevanten Partikelmassenströme ermittelt und durch Mehrfachmessungen statistisch abgesichert. Unter Verwendung der bereits im Kapitel 5, Abbildung 15 dargestellten Vereinfachungen und den dort erläuterten Gleichungen werden erneut für die ermittelten Partikelmassenströme die Transmissionsgrade bestimmt und in der Abbildung 36 dargestellt.

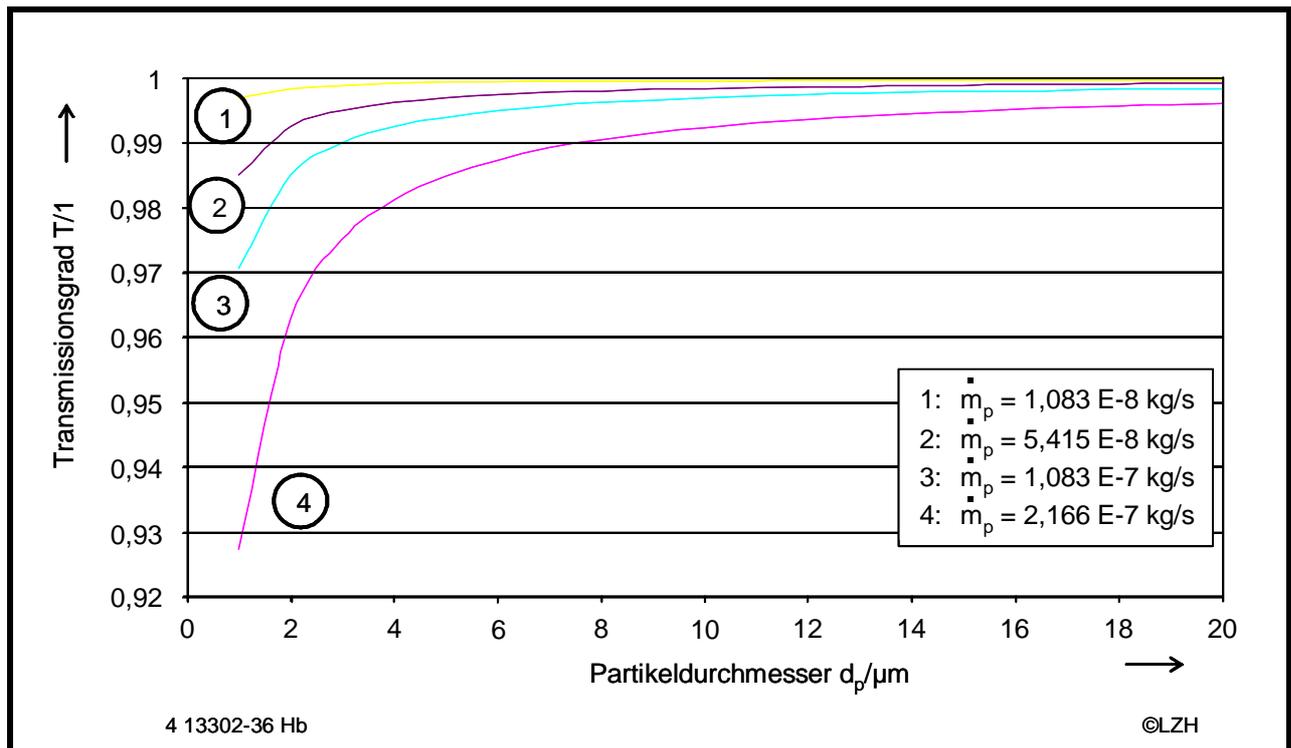


Abbildung 36: Darstellung des Transmissionsgrades in Abhängigkeit der Partikeldurchmesser 1-20 μm der verwendeten Massenströme

Aus der Abbildung wird deutlich, dass selbst bei dem höchsten ermittelten Partikelmassenstrom der Transmissionsgrad im betrachteten Partikeldurchmesser nahezu eins beträgt und die Annahme einer zu hohen Absorption im Partikelkollektiv hiermit widerlegt ist. Unter Berücksichtigung der Vorschubgeschwindigkeit und der Gesamtlänge der in der Abbildung 35 abgebildeten Schweißbahn von acht Millimetern resultiert eine insgesamt geförderte Partikelmasse von $1,083 \cdot 10^{-4}$ kg. Die Hinzuziehung der geometrischen Ausmaße des in der Abbildung 15 dargestellten Profils der Zusatzwerkstoffzufuhr ergibt eine erhebliche Menge an Partikeln, die nicht am Prozess teilnehmen und durch die Prozessführung in einer geschlossenen Schutzgaskammer diese auch nicht verlassen können. Durch die Gasdynamik, die durch das Trägermedium des Zusatzwerkstoffes in der Schutzgaskammer entsteht, werden diese Partikel erneut aufgewirbelt und zu einem sich ständig wechselnden Anteil auch durch den Laserstrahl geführt. Unter der Annahme, dass

es durch diesen Effekt zu einer wesentlichen Erhöhung des Absorptionsgrades innerhalb des Partikelstromes kommt, sind die auftretenden Phänomene erklärbar.

Zur Qualifizierung der Annahme werden die Partikelgrößenverteilungen des Zusatzwerkstoffes zum einen vor dem Einschalten der Laserstrahlquelle und zum anderen während des laufenden Prozesses durchgeführt. Die Partikelgrößenverteilung wird mittels eines elektrischen Niederdruck-Kaskaden-Impaktorsystems (ELPI) der Fa. Dekati (Tampere, Finnland) durchgeführt. Es handelt sich hierbei um ein Partikelgrößenspektrometer mit dem in Echtzeit Partikelgrößenverteilungen in den Größenordnungen 0,03 – 10 μm gemessen werden können. Die Klassifizierung und Auswertung erfolgt durch Selektion der im Vorfeld durch eine Koronaaufladung aufgeladenen Partikel und die Abscheidung in zwölf Sektionen in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmessers der Partikel.

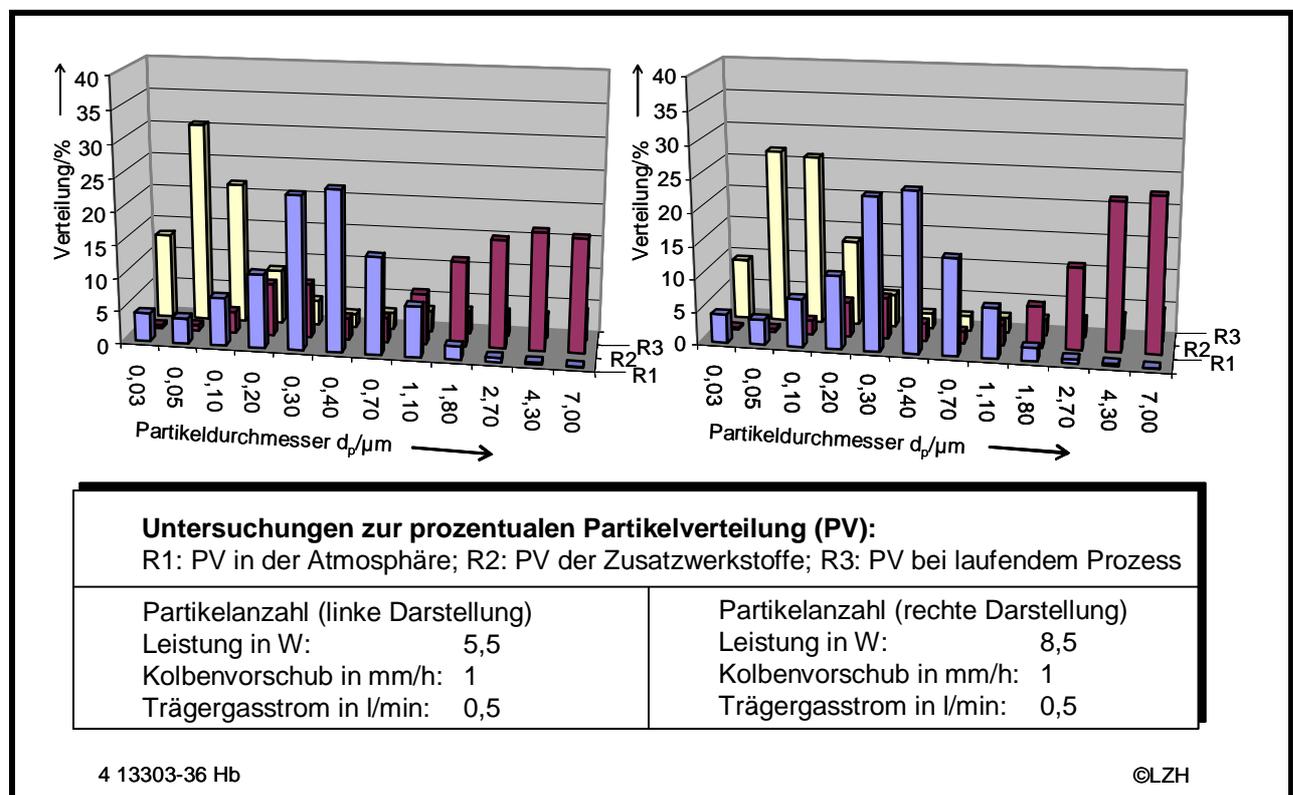


Abbildung 37: Partikelanzahlverteilung vor und während des Schweißprozesses bei einem Kolbenvorschub von 1 mm/h

In der Abbildung 37 und der Abbildung 38 sind die Ergebnisse der Messungen für unterschiedliche Leistungen und Zusatzwerkstofförderraten dargestellt. Gemessen worden sind jeweils drei Messreihen, wobei die Messreihe R1 die vorliegende Partikelverteilung vor dem Einschalten der Zusatzwerkstoffzufuhr und der Laserstrahlung wiedergibt und in der Messreihe R2 die gemessenen Daten nach dem Einschalten der Zusatzwerkstoffzufuhr ohne Laserstrahlung dargestellt sind. Die Messreihe R3 stellt

schließlich die Ergebnisse während des Schweißprozesses dar. In der Abbildung 37, linke Darstellung, sind die Messdaten bei einer Laserleistung von 5,5 W und einem Kolbenvorschub von 1 mm/h dargestellt, dies entspricht einem Partikelmassenstrom der Kurve 1 in der Abbildung 36. Aus der Abbildung wird deutlich, dass es zu einer maßgeblichen Verschiebung der Partikelgrößenverteilung in Richtung Kleinstpartikel kommt. Aufgrund der Größe und der Häufigkeit der Partikel handelt es sich nachweislich um während des Prozesses verdampfte und später kondensierte Partikel, welches die oben getroffenen Annahmen bestätigt. Auch die Tatsache, dass es bei einer Leistungssteigerung zu einem weiteren Anstieg der Kleinstanteile kommt (vgl. Abbildung 37, rechte Darstellung), bestätigt diese Annahme.

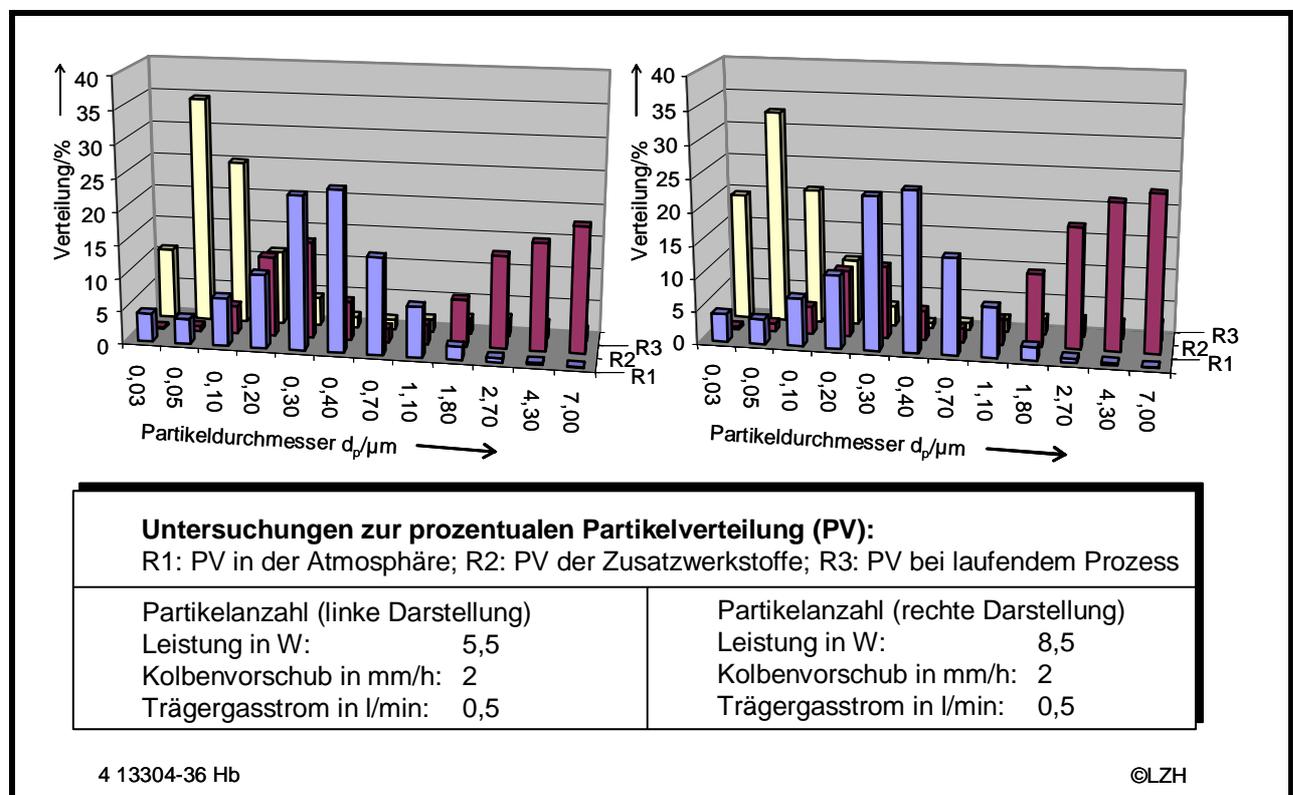


Abbildung 38: Partikelanzahlverteilung vor und während des Schweißprozesses bei einem Kolbenvorschub von 2 mm/h

Zur Überprüfung der Auswirkungen einer weiteren Erhöhung des Pulvermassenstroms auf die Partikelverteilung sind Messungen bei gleichen Leistungen und doppeltem Massenstrom durchgeführt worden, die in der Abbildung 38 dargestellt sind. Es zeigt sich, dass der Anteil an Kleinstpartikeln im Vergleich zur vorherigen Messung deutlich ansteigt, welches wiederum auf den Anstieg des Absorptionsgrades innerhalb der Partikelkollektive hinweist.

Anhand der Ausführungen wird deutlich, dass die Eigenschaften der entwickelten Zusatzwerkstoffzuführung und insbesondere der Partikelfokussierung im betrachteten Fall als nicht optimal bezeichnet werden können.

Um das hohe Potential des entwickelten 3D-Mikro-Laserstrahlauftragschweißverfahrens, welches durch die Einzelbahnschweißungen in der Abbildung 30 und der Abbildung 32 verdeutlicht werden konnte, dennoch auch für komplexere Geometrien, bestehend aus Viellagenschweißungen, nutzen zu können, werden im Folgenden die Problematik und die Möglichkeiten einer Verbesserung der Erzeugung sich fokussierender Partikelstrahlen im aerodynamischen Strömungsfeld diskutiert. Ausgehend von früheren Arbeiten und bestehenden Entwicklungen werden im Folgenden die beschriebenen Phänomene hinsichtlich der aktuellen Problematik unter Hinzuziehung weiterer umfangreicher experimenteller und simulatorischer Arbeiten diskutiert und in Richtung geeigneterer Fokussierungsmöglichkeiten weiterentwickelt.

8.2 Prozessangepasste Systemtechnik

8.2.1 Aerodynamische Partikelfokussierung

Partikelstrahlen finden seit ihrer ersten Erzeugung von Murphy und Sears [114] im Jahr 1964 eine weite Verbreitung u. a. in der Aerosolmesstechnik. Das Interesse verstärkte sich, als im Laufe des letzten Jahrzehnts bekannt wurde, dass kollimierte Strahlen die Online-Vermessung von Partikelgrößen und deren chemischer Zusammensetzung ermöglichen bzw. vereinfachen [115,116,117,118,119,120]. Mittlerweile verwenden nahezu alle Systeme genannter Art Partikelstrahlen kontrollierter Dimensionen und Divergenzwinkel. Der Partikelstrahl wird hierbei durch die Expansion einer Zweiphasenströmung, bestehend aus den zu untersuchenden Partikeln und einem Trägergasstrom, durch ein Ein- oder Mehrblendensystem erzeugt und im Anschluss bzgl. Partikelgeschwindigkeit und -größe vermessen.

Anschließend erfolgt zur chemischen Analyse die Verdampfung der Partikel entweder auf einer heißen Oberfläche [115,119] oder mittels eines Laserstrahls [117,118]. Insbesondere bei letzterem Verfahren bestehen hohe Anforderungen an die Qualität der Partikelstrahlkollimierung, da idealerweise der Partikelstrahl von den Fokusabmessungen des Laserstrahls abgedeckt sein sollte. Basierend auf der genannten Anwendung sind eine Vielzahl von theoretischen und experimentellen Arbeiten durchgeführt worden, die die Bestimmung der Einflussgrößen auf die Faktoren Strahldurchmesser und Strahldivergenz sowie der Verfahrensgrenzen zum Ziel hatten.

Zunächst ausgehend vom Einlinsensystem wurde erkannt, dass eine Kollimierung des Partikelstrahls in zufriedenstellenden Größenbereichen lediglich für sehr kleine Partikelgrößenfraktionen möglich war [121,122,123]. Der Versuch, die Qualität des Partikelstrahls durch das Anlegen eines weiteren Gasstromes zu erhöhen, führte zwar zu einer wesentlichen Verbesserung und somit zu einer Verringerung des Strömungsdurchmessers [124,125,126], beinhaltete jedoch eine komplexere Versuchstechnik und konnte sich zumindest für den oben geschilderten Anwendungsfall nicht durchsetzen [127,126]. Versuche, den Divergenzwinkel des Partikelstrahls ohne Verwendung einer zusätzlichen Gasphase zu reduzieren, führten zu einem Mehrblendensystem, bei dem sich das Partikel-Gas-Gemisch beim Durchlaufen mehrerer sich verkleinernden Blenden nahe der Mittelachse konzentriert. Anschließend wurde der dadurch entstandene Partikelstrahl vergleichsweise mit der Einzelblende ins Vakuum expandiert, wodurch eine signifikante Verringerung des Partikelstrahldurchmessers erreicht werden konnte [119,127,128,129].

Neben den Untersuchungen innerhalb der o. g. Rohrströmungen fanden auch umfangreiche experimentelle Untersuchungen im Bereich der Fokussierung von Partikelstrahlen anhand konischer Düsen statt. Innerhalb dieser Untersuchungen konnten Zusammenhänge zwischen den zu fokussierenden Partikelgrößen, dem Winkel der Fokussierungseinheit und dem Ort der Fokussierung festgestellt werden. Des Weiteren fanden Untersuchungen bzgl. eines idealen Durchmesserverhältnisses zwischen Austritts- und Partikeldurchmesser statt, deren Einhaltung das Phänomen der Partikel-Wand-Kollisionen verhindern sollte. Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist erkannt worden, dass eine Fokusbildung nur bis zu einem kritischen Partikeldurchmesser möglich ist und die Qualität des Fokussdurchmessers mit der Anzahl unterschiedlicher Partikeldurchmesser sehr stark eingeschränkt wird [124,130]. Die experimentellen Arbeiten sind anhand unterschiedlicher Modelle theoretisch qualifiziert worden [131,132].

8.2.1.1 Die partikelbeladene Zweiphasenströmung

Wie bereits oben dargestellt, zeigt sich auch innerhalb der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, dass insbesondere die aerodynamische Fokussierung der Mikropartikel in das laserinduzierte Schmelzbad ein hohes Verbesserungspotential aufweist.

Konventionell erfolgt die Deponierung des Zusatzwerkstoffes beim 3D-Laserstrahlauftragschweißen durch die Zuführung eines Gemisches aus Trägergas und Partikeln, die in das laserinduzierte Schmelzbad injiziert werden (vgl. Kapitel 5). Die Partikel bewegen sich hierbei in dem aerodynamischen Strömungsfeld des Trägergases und ändern ihre Bewegungsrichtung durch komplizierte Wechselwirkungen mit dem Fluid und den anderen

Partikeln. Die mechanische Formung des Partikelstrahls z. B. durch Blenden und Düsen erfolgt hierbei nicht direkt durch das Formungsobjekt, sondern vielmehr durch das dadurch entstehende aerodynamische Feld.

Zur Veranschaulichung des Partikel-Trägergas Strömungsfeldes bei unterschiedlichen Einstellungen sind umfangreiche Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durchgeführt worden. Eingesetzt wurde hierzu eine Kamera des Typs Extrapro Motion Analyzer EM 1012 der Firma Kodak. Die maximale Anzahl der pro Zeiteinheit realisierbaren Bilder beträgt für Vollbilder bis zu 1000 Bilder pro Sekunde, für Teilbilder werden bis zu 12000 Bilder pro Sekunde erreicht. Die Beleuchtung der Prozesszone erfolgt durch eine fasergekoppelte Laserdiode (Typ: OPC-BO15-FCPS der Firma Spectra Physics).

Exemplarisch für die durchgeführten Untersuchungen sind in der Abbildung 39 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dargestellt. Die Aufnahmen zeigen das durch die verwendete koaxiale Düse erzeugte Strömungsprofil, das innerhalb der Untersuchungen eingestellt worden ist.

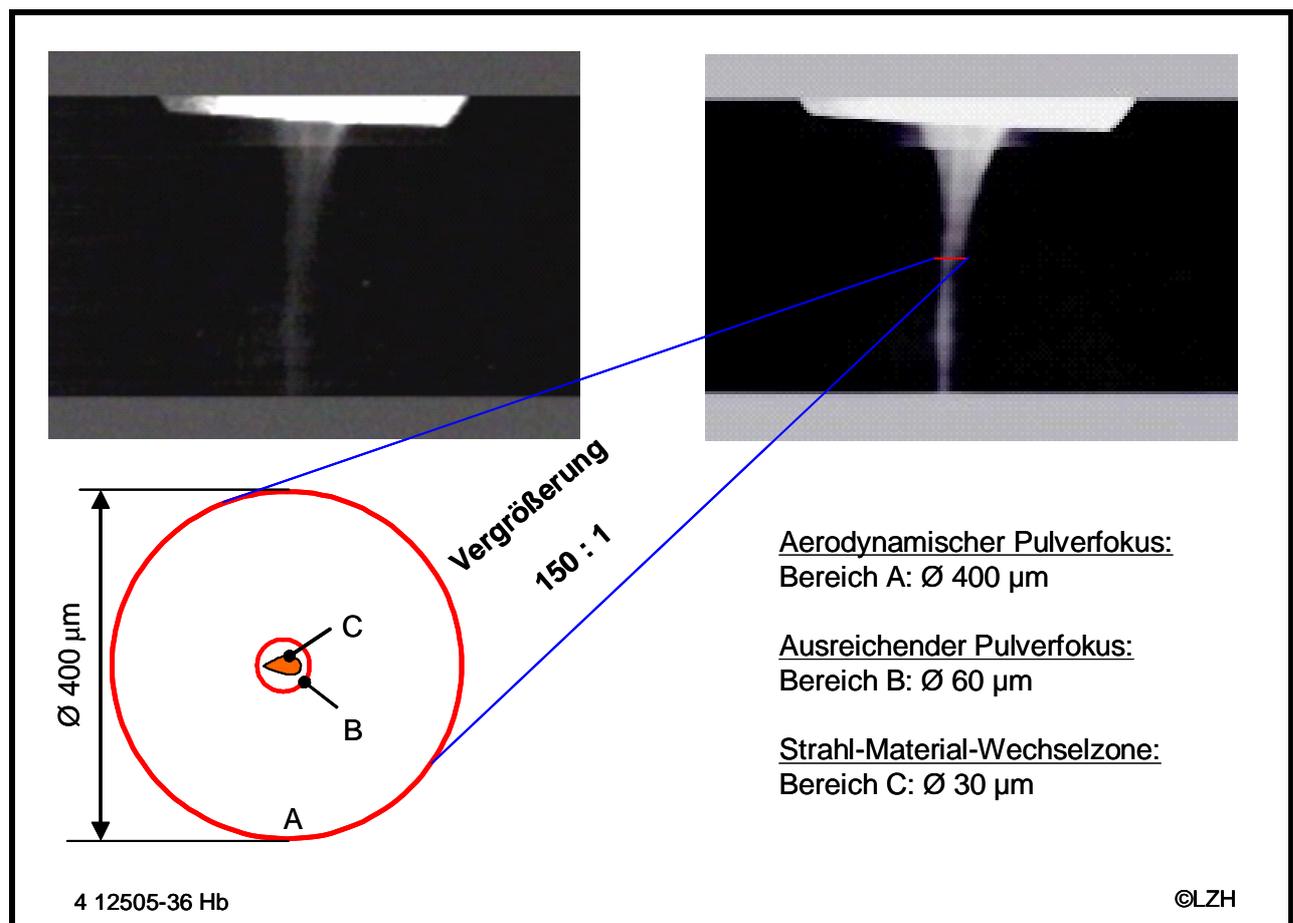


Abbildung 39: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Partikel-Trägergas Strömungsfeldes

Bei der Aufnahme oben links im Bild handelt es sich um eine Einzelaufnahme, bei der Aufnahme oben rechts um eine durch in diesem Fall 1400 Einzelbilder überlagerte Darstellung, die eine Sichtbarmachung der Geometrie des erzeugten Partikelstrahlfokus ermöglicht. Nach Auswertung der überlagerten Aufnahmen ergibt sich ein Partikelfokus im Bereich von 400 μm .

Durch die Gegenüberstellung des erreichten Partikelfokus mit der eigentlichen für das Erzeugen von Mikrobauteilen relevanten Strahl-Material-Wechselzone und unter Berücksichtigung eines für die Prozesssicherheit ausreichenden Faktors derselben von zwei wird das enorme Verbesserungspotential innerhalb des Verfahrens deutlich. Als nachteilig gestaltet sich hierbei neben den erwähnten Effekten der Strahlungsabsorption durch nicht am Schweißvorgang teilnehmende Partikel und den damit verbundenen außergewöhnlich hohen Pulververlusten insbesondere ein hoher erforderlicher volumetrischer Anteil der dispersen Phase zur Gewährleistung von ausreichendem Zusatzwerkstoff in der relevanten Strahl-Material-Wechselzone, der ebenfalls erheblich zu einer Verschärfung der im Abschnitt 8.1 gezeigten Auswirkungen der Strahlungsabsorption im Partikelkollektiv beiträgt. Durch die hohen volumetrischen Anteile der dispersen Phase bzw. dem damit verbundenen verhältnismäßig kleinen mittleren Abstand der Partikel sind auch die Wechselwirkungen in Form von Kollisionen zwischen den Partikeln nicht mehr vernachlässigbar [133,134]. Resultierend hieraus erfolgt eine weitere signifikante Vergrößerung des Partikelstrahlfokusses.

Ursachen für Kollisionen sind immer Relativgeschwindigkeiten zwischen einzelnen Teilchen, wobei drei Gründe für Relativgeschwindigkeiten unterschieden werden können: die Brownsche Teilchenbewegung, unterschiedliche lokale Strömungsverhältnisse und die Sedimentation. Zur Verdeutlichung sind die prinzipiellen Ursachen der Partikel-Partikel-Kollisionen in der Abbildung 40 dargestellt.

Innerhalb der Brownschen Bewegung, die insbesondere bei sehr kleinen Partikeln relevant ist, bewegen sich die suspendierten Partikel vollständig zufällig und stoßen stochastisch regellos gegeneinander. Bei Partikel-Partikel-Kollisionen, hervorgerufen durch unterschiedliche Strömungsverhältnisse, können wiederum zwei Fälle unterschieden werden: Kollision aufgrund von Scherung und Kollision aufgrund von Trägheitsunterschieden. Bei der Kollision aufgrund von Scherung bewegen sich Partikel auf benachbarten Stromlinien mit dem Fluid. Allerdings bewegt sich das Fluid und damit auch die Partikel mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, so dass das schnellere Teilchen das langsamere einholt und es zur Kollision kommt. Bei der Kollision aufgrund von Trägheitsunterschieden weichen unterschiedlich träge Partikel unterschiedlich stark von

ihren ursprünglichen Stromlinien ab und kollidieren infolgedessen. Dieses Phänomen tritt vornehmlich in Bereichen auf, in denen die Strömung durch mechanische Formung ihre Richtung ändert, sowie durch entstehende Turbulenzen ohne mechanische Strömungsformung. Innerhalb der Sedimentation kommt es durch unterschiedlich große und damit unterschiedlich schwere Partikel zu unterschiedlichen Sedimentationsgeschwindigkeiten und infolgedessen ebenfalls zu Kollisionen. Zusätzlich zu Partikel-Partikel-Kollisionen treten teilweise als Folgeerscheinung im endlichen geometrischen Formungsobjekt Partikel-Wand-Kollisionen auf.

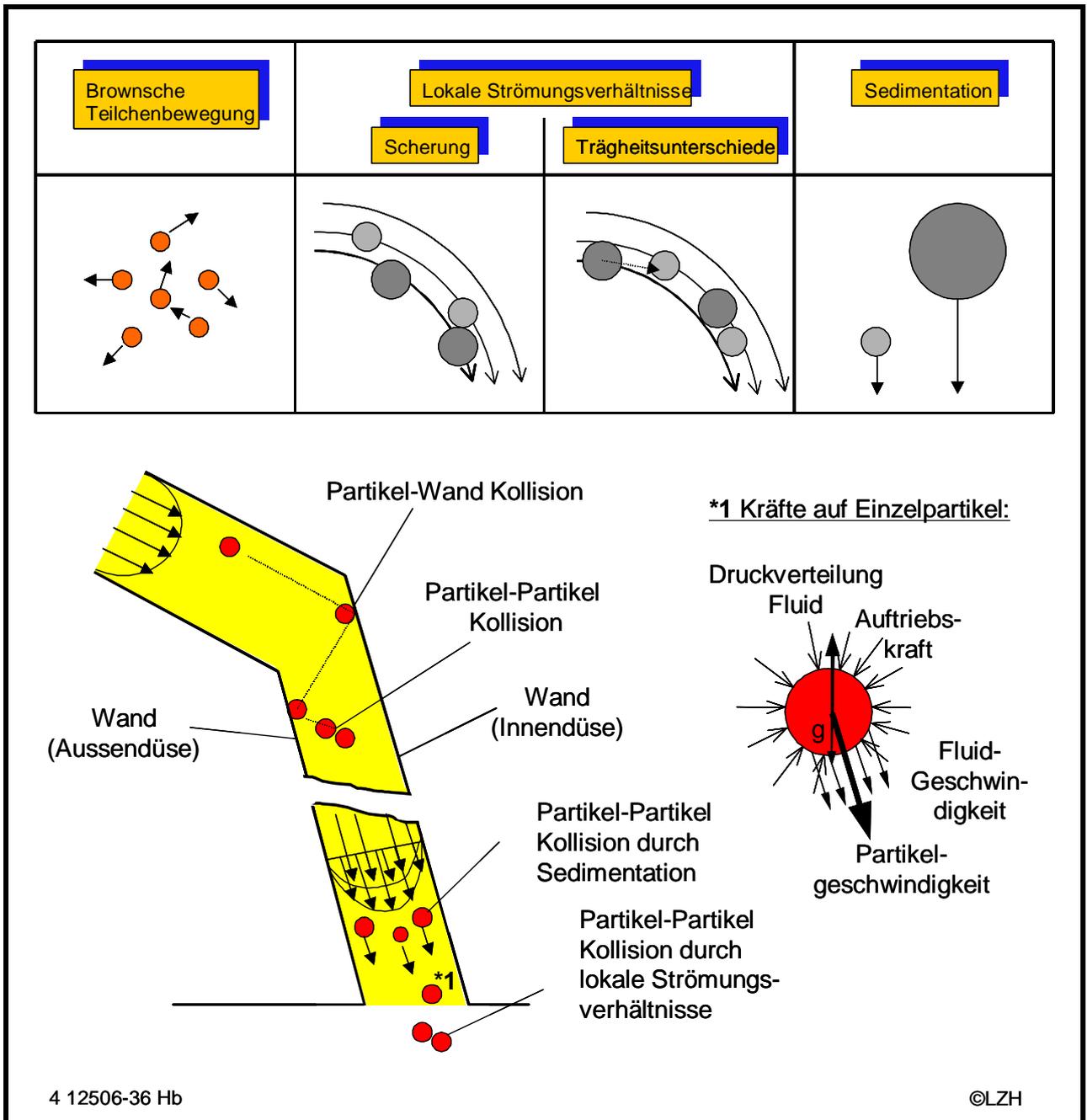


Abbildung 40: Ursachen für Partikelkollisionen

8.2.1.2 Numerische Strömungsanalyse

Zur Qualifizierung der experimentellen Versuchsergebnisse sind ergänzend zu den Strömungsvisualisierungsarbeiten numerische Untersuchungen der verwendeten Düsengeometrie durchgeführt worden. Verwendet wurde hierzu das CFD-Programm (Computational Fluid Dynamics) STAR-CD. Es handelt sich hierbei um ein Finite-Volumen-Verfahren, bei dem das dreidimensionale Strömungsgebiet in ein Netz aus einzelnen, nichtüberlappenden Kontrollvolumina (Fluidzellen) unterteilt wird. Die Überführung der Differentialgleichungen in algebraische Gleichungen besteht bei der Methode der Finiten Volumen darin, die Differentialgleichungen über die einzelnen Kontrollvolumina zu integrieren. Im Gegensatz zu den Finiten Differenzen ist also nicht die differentielle, sondern die integrale Form der Transportgleichungen Ausgangspunkt der Berechnungen. Eine Erhöhung der Diskretisierungsgenauigkeit wird durch feinere und angepasstere Netze erreicht.

In der Abbildung 41 sind die Kontrollvolumina der innerhalb der Versuche verwendeten Düse dargestellt. Das Modell besteht aus den Wandungen der Innen- und Außendüse und einem im Modell als Zylinder berücksichtigten Kontrollvolumen zur Darstellung des Strömungsverhaltens außerhalb der Düse.

Als Rand- und Anfangsbedingungen für die Simulation dienen neben den durch die verwendete Düse festgelegten geometrischen Daten die Ergebnisse von durchgeführten Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) Versuchen. Messung und Auswertung erfolgen mit Hilfe der zugehörigen, kommerziellen Software FLOWare. Zur Aufnahme von Strömungsfeldern ist eine Vielzahl von Einzelmessungen durchgeführt worden, wobei die LDA-Sonde mittels einer Traversiereinrichtung verfahren wird, die ebenfalls von der Software angesteuert wird. Da es sich um eine eindimensionale LDA-Messeinrichtung handelt, ist die Sonde zur Messung einer zweiten Geschwindigkeitskomponente um 90° um ihre Längsachse geschwenkt und in dieselbe Positionen gefahren worden. Auf diese Weise sind die Partikelgeschwindigkeiten beider Geschwindigkeitskomponenten der aus der Düse austretenden Partikel in unterschiedlichen Ebenen unterhalb des Düsenaustritts vermessen worden.

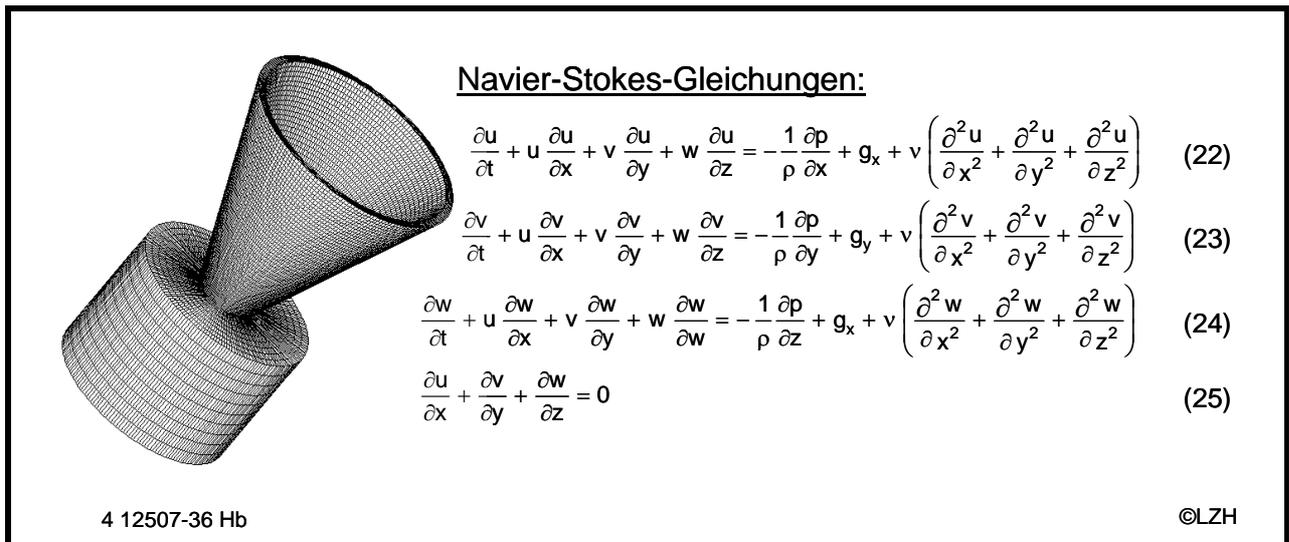


Abbildung 41: Kontrollvolumina der verwendeten Düse

Die ermittelten Geschwindigkeitswerte dienen als Randbedingung für die oben beschriebene Simulation. Berechnet wurden ausschließlich prozessrelevante Einstellungen, die auch während der experimentellen Versuche verwendet worden sind. Die gewählten Einstellungen befinden sich alle im laminaren Bereich mit Reynoldszahlen im Bereich von 100 bis 450. Neben den geometrischen Abmessungen ist als Nebenbedingung von einer isothermen und adiabaten Strömung mit vernachlässigbaren Partikel-Partikel-Kollisionen ausgegangen worden. Exemplarisch für die durchgeführten Berechnungen ist ein Simulationsergebnis in der Abbildung 42 dargestellt.

In der linken Bildhälfte sind die Verläufe der Partikelbahnen im betrachteten Kontrollvolumen innerhalb und außerhalb der Düse sowie beim Auftreffen auf ein Prallblech dargestellt. Die rechte Bildhälfte zeigt den Bereich außerhalb der Düse, wobei neben den Partikelbahnen auch die Geschwindigkeitsverteilung des Trägergasstromes dargestellt ist.

Unter Berücksichtigung der geometrischen Eingaben der im experimentellen Teil verwendeten Düse lässt sich die Ausdehnung des Partikelfokus innerhalb der Simulation auf einen Durchmesser von circa 300 μm festlegen und bestätigt somit weitestgehend die dargestellten experimentellen Ergebnisse. Die Ausdehnungsdifferenz im Vergleich mit den Visualisierungsergebnissen wird auf die Nichtberücksichtigung der während des Prozesses stattfindenden Partikel-Partikel-Kollisionen zurückgeführt.

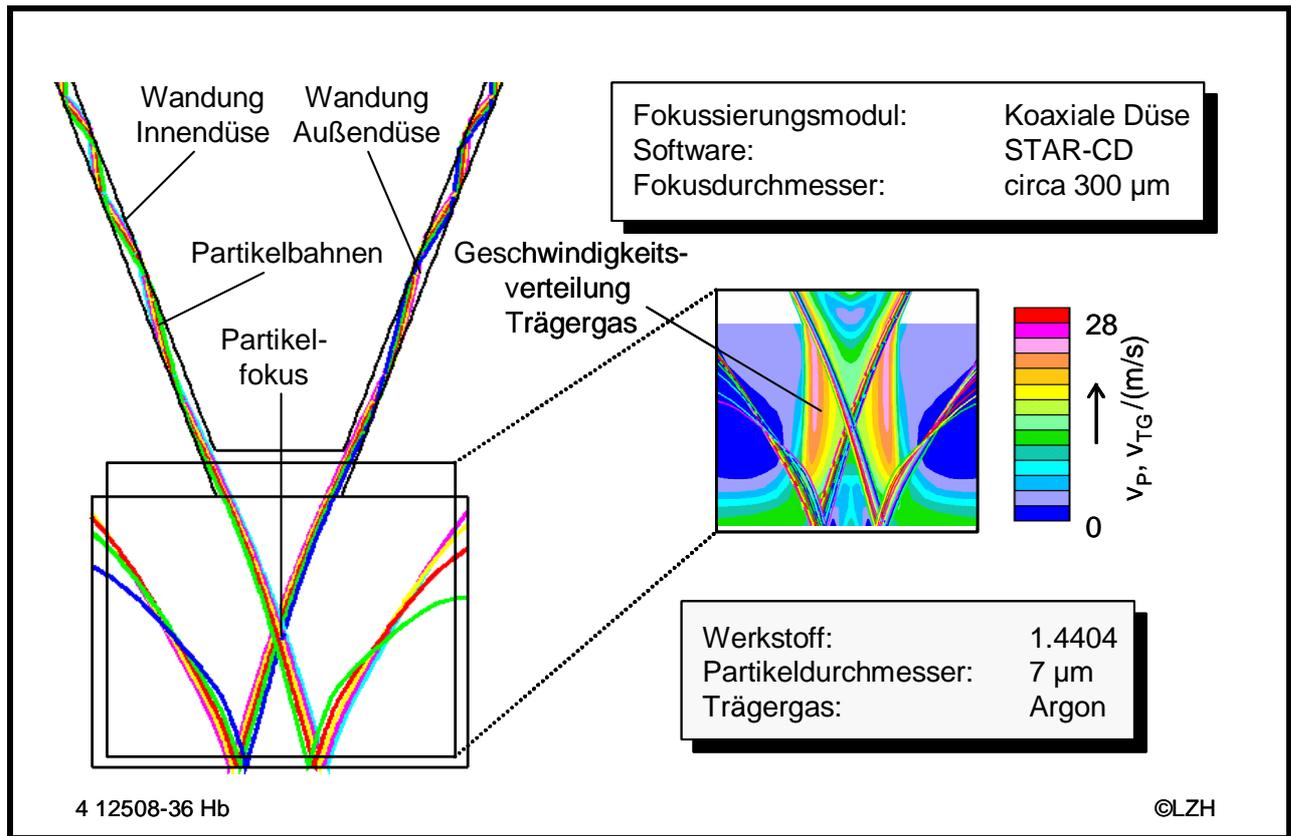


Abbildung 42: Simulationsergebnisse

8.2.2 Elektrostatische Partikelfokussierung

Aufgrund der dargestellten Defizite innerhalb der aerodynamischen Partikelfokussierung beim 3D-Mikro-Laserstrahlauftragschweißen wird im Folgenden die Möglichkeit betrachtet, Mikropartikel durch den Einfluss eines elektrischen Feldes in den unteren zweistelligen Mikrometerbereich zu fokussieren. Das Funktionsprinzip dieser Technik findet bereits eine breite Anwendung. Beispiele hierfür sind die Fokussierung von Elektronen im Rasterelektronenmikroskop sowie von ionisierten Atomen im Ionenmikroskop in den Nanometerbereich. Obwohl bereits große Erfolge in der Teilchentechnologie existieren, ist die Manipulation von Teilchen unterschiedlicher Art und verschiedener kinetischer Energie Bestandteil aktueller Forschungsinhalte [135,136].

Die Kernphysik, die innerhalb dieses Bereiches am weitesten entwickelt ist, nennt diese Strahlen Schwerionenstrahlen, bezogen auf die Ionen schwerer Atome. Schwerionenstrahlen unterscheiden sich in ihrer Wechselwirkung mit Festkörpern erheblich von den klassischen Ionenstrahlen aufgrund der um mehrere Größenordnungen höheren spezifischen Energie. Dabei bewegt sich die kinetische Energie in der Größenordnung von Gigaelektronenvolt (10^9 eV).

Aber auch bei geringerer kinetischer Energie im Bereich von Megaelektronenvolt ergeben sich reichhaltige Möglichkeiten für die Mikromaterialbearbeitung. Während Ionenstrahlen nur in wenigen oberflächennahen Atomschichten (etwa 10 μm bei Energien von 1 MeV/A pro Nukleon) Veränderungen bewirken, dringen Schwerionenstrahlen auf Grund der sehr viel höheren Energie sehr viel tiefer in Festkörper ein (etwa 100 μm bei Energien von 10 MeV/A pro Nukleon) und rufen entlang ihrer Flugbahn starke strukturelle Veränderungen hervor. Neben rein grundlagenorientierten Forschungsinhalten, wie z. B. Veränderungen von Werkstoffeigenschaften und dem Einsatz in der biologischen und medizinischen Forschung, finden Schwerionenstrahlen mittlerweile auch Anwendungen in der Industrie, insbesondere in dem Bereich der Mikrostrukturierung [137,138].

Im Gegensatz dazu stehen die Forschungsinhalte der Optik kalter Atome, wo zur Zeit intensive Untersuchungen durchgeführt werden. Ziel hierbei ist, einzelne Atome zu lokalisieren und zu manipulieren [139,140], die kinetische Energie bewegt sich hierbei in der Größenordnung Nanoelektronenvolt (10^{-9} eV) [141].

Innerhalb des für die vorliegende Arbeit relevanten Bereichs zwischen den beiden genannten Größenordnungen 10^9 eV und 10^{-9} eV existieren bereits eine große Anzahl von in der Praxis etablierten Ansätzen zur Manipulation der Teilchenbewegung. Beispiele hierfür sind die Elektrofiltration des Staubes, die Elektrospray-Technologie, die Aerosol-Technologie und die elektrostatische Lackierung. Obwohl die Aufgabenstellung und die theoretischen Grundlagen der Fokussierung von Partikeln oder Tröpfchen der von Atomteilchen ähnlich sind, liegen die Größenordnungen der Parameter dieser Anwendungsgebiete weit auseinander. Unabhängig von der zu betrachtenden Aufgabenstellung lässt sich die Lösung des Gesamtproblems in den meisten der angesprochenen Aufgabenstellungen in zwei Phasen darstellen, zum einen der Aufladung der Partikel und zum anderen die Möglichkeiten der Manipulation der geladenen Partikel. Diese beiden Phasen werden in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

8.2.2.1 Aufladung von Partikeln

Partikel können durch unterschiedliche Methoden wie z. B. durch induzierte Emission von Elektronen (Photoaufladung [142]) oder durch die Anlagerung von freien Elektronen und Ionen elektrisch geladen werden. Bei der zuletzt genannten Art der Aufladung müssen dem System freie Ionen zur Verfügung gestellt werden. Dies kann prinzipiell durch ionisierende Strahlung, durch Höhenstrahlung oder durch Plasmen [143] bzw. Koronaaufladungen [144] (Feldaufladung) erfolgen. Je nachdem, ob nur positive bzw. negative Ionen oder beide Ionenarten auftreten, wird zwischen einer unipolaren bzw. bipolaren Aufladung unterschieden. Findet zudem noch Kollision durch die Brownsche Bewegung der Ionen

statt, so spricht man von Diffusionsaufladung [145]. Hierbei wird vorausgesetzt, dass das äußere elektrische Feld vernachlässigbar klein ist. Die Aufladung erfolgt bei der Diffusionsaufladung mit logarithmischer Zeitabhängigkeit, weshalb keine Sättigungsladung existiert.

In der Praxis sind verschiedene Mechanismen gleichzeitig wirksam, wobei bei kleineren Partikeln die Diffusionsaufladung dominiert. Für die bipolare Diffusionsaufladung (Boltzmann bzw. Fuchs-Modell [146]) können die resultierenden Ladungen in der Form zusammengefasst werden, dass Partikel kleiner 0,1 bis 0,3 Mikrometer nur einfach positiv oder negativ geladen sind und Nanopartikel fast alle ungeladen sind [147]. Insgesamt gesehen besitzen die Partikel nur eine mittlere Ladung, so dass die bipolare Diffusionsaufladung im Vergleich zu den im Folgenden aufgeführten Mechanismen als die mit der geringsten Aufladungsrate angesehen werden kann.

Grundlage bei der Feldauffüllung [148] ist die Verzerrung des elektrischen Feldes in unmittelbarer Nähe der Partikel aufgrund ihrer dielektrischen Eigenschaften. Da Feldlinien auf der Partikeloberfläche enden, finden Gasionen, die entlang dieser Feldlinien wandern, zwangsläufig den Weg zum Partikel. Mit zunehmender Aufladung baut sich jedoch ein Eigenfeld mit abstoßender Wirkung auf, das durch Erreichen einer Sättigungsladung die Aufnahme weiterer Gasionen verhindert (vgl. Abbildung 43). Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der Sättigungsladung vom Partikeldurchmesser kommt diese Art der Aufladung insbesondere bei großen Partikeln zum Tragen.

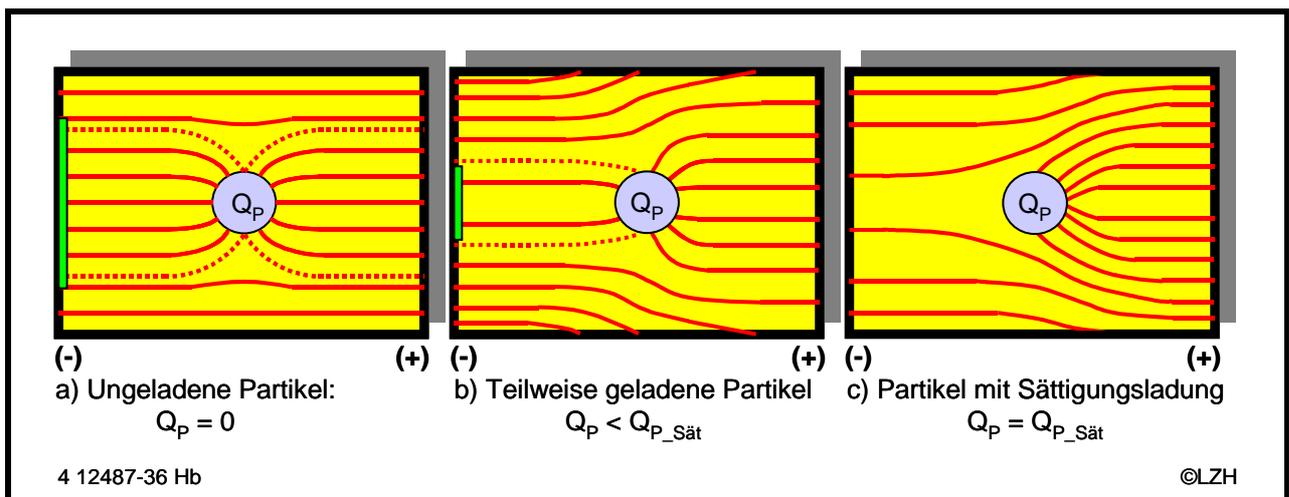


Abbildung 43: Unipolare Feldauffüllung

Prinzipiell finden drei Arten von Aufladungsmechanismen industrielle Anwendung: die Kontakt- oder Triboaufladung, die Elektroprühauffüllung und die Aufladung durch Korona und Plasmen, die im Folgenden erläutert werden.

Das für die Kontaktaufladung genutzte physikalische Phänomen ist die Möglichkeit der Ladungsakkumulation auf einer Isolatoroberfläche, was beispielsweise durch Reibung erreicht werden kann [149]. Werden zwei Leiter gegeneinander gerieben, ist der Ladungsübertrag gewöhnlich nicht größer als der, der durch eine einfache Kontaktierung erreicht werden würde. Beim Reibkontakt zweier Isolatoren hingegen erfolgt die Ladungsübertragung entlang der gesamten Reibungsfläche und ist hierdurch wesentlich größer als bei einem singulären Kontakt. Die Ladungsverteilung auf der Isolatoroberfläche ist metastabil und würde zur Verringerung der elektrostatischen Energie zurückfließen, was jedoch - im Gegensatz zum Leiter – durch den hohen Widerstand verhindert wird. Während die Mechanismen der Kontaktaufladung für Leiter gut verstanden sind, gibt es im Bereich der Isolatoren noch Unklarheiten [150,151,152].

Die Elektroprühaufladung [153] eignet sich besonders zur Aufladung leitender Flüssigkeiten, welche in Form eines Sprühnebels durch eine Düsenanordnung versprüht werden, die mit Erdpotential verbunden ist. Unmittelbar vor der Düse befindet sich der sogenannte Potentialring, welcher mit hoher positiver oder negativer Gleichspannung versorgt wird. Durch das elektrische Feld zwischen Potentialring und geerdeter Düse werden die Ionen in der Flüssigkeitssäule entsprechend der Polarität der angelegten Spannung in diese zurückgedrängt bzw. an deren Oberfläche bewegt. Löst sich die Flüssigkeit in einzelne Tröpfchen auf, so sind diese mit einer Überschussladung der entsprechenden Polarität behaftet. Die Höhe der erreichbaren Aufladung wird im Wesentlichen von der elektrischen Oberflächenspannung des Mediums beeinflusst. Anwendung findet dieser Mechanismus bereits bei der mechanischen Zerstäubung von Flüssigmetallen zur Herstellung von Metallpulvern.[154]

Eine Koronaentladung tritt auf, wenn zwischen Elektroden, von denen mindestens eine kleine Krümmungsradien aufweist, eine Hochspannung angelegt wird. Hierbei entsteht ein stark inhomogenes elektrisches Feld. In den Bereichen hoher Feldstärke kommt es durch Ionisationsstöße an den Gasmolekülen und -atomen durch beschleunigte Elektronen zur Entstehung von Ionenpaaren, einzelnen Elektronen und positiv geladenen Atomen und Molekülen. Die freigesetzten Elektronen werden ebenfalls beschleunigt und erzeugen kaskadenartig weitere freie Elektronen. Außerhalb des Bereichs hoher Feldstärke reicht die Beschleunigung nicht mehr zur Ionisation aus und die Elektronen tendieren dazu, sich an neutrale Atome oder Moleküle anzulagern, wodurch es zur Aufladung derselben kommt.

Trotz einer großen Anzahl theoretischer und experimenteller Untersuchungen der elektrischen Phänomene zur Aufladung von Mikropartikeln lassen sich zur Zeit keine Modelle zur sicheren Prognose finden [155,156]. Obwohl sowohl für die Feldaufladung und die

Diffusionsaufladung physikalische Zusammenhänge bestehen [157], zeigt sich, dass die experimentell ermittelten Werte weit über der einfachen Summation beider Ladungsbeiträge liegen. Dies führte zur Anwendung von kombinierten Auflademodellen, wobei in diesem Zusammenhang auf die Field Assisted Diffusion (FAD) nach Smith und McDonald [158], die Combined Field Diffusion (CFD) nach Liu und Kappadia [159] und die Field Modified Diffusion (FMD) nach Lawless [160] verwiesen werden soll.

Die Abschätzung der Partikelladung ist eine wichtige Voraussetzung für die durchzuführenden Simulationsarbeiten. Aus diesem Grund werden verfügbare veröffentlichte experimentelle Ergebnisse näher analysiert. Inhalte dieser Arbeiten sind u. a. umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen zum Thema Pulverlackapplikationen, innerhalb derer die Aufladungsraten abgeschätzt worden sind und die im Abschnitt 8.2.2.2 „Abschätzung der Partikelaufladung“ eingehender betrachtet werden.

Da die Möglichkeit der Fokussierung ionisierter Teilchen nicht allein von ihrer Größe und der daraus resultierenden Ladung bestimmt wird, sondern vielmehr auch sehr stark von der Masse der Einzelpartikel beeinflusst wird, wird an dieser Stelle der Begriff der spezifischen Ladung Q_m und der oberflächlichen Ladungsdichte Q_s eingeführt. Ersteres ist der Quotient aus Ladung des Einzelpartikels und der Masse des Einzelpartikels, der in der Literatur im Bereich von 10^{-2} bis 10^{-3} C/kg angegeben wird [161,162]. Die oberflächliche Ladungsdichte hingegen ist als Quotient aus Ladung und Oberfläche definiert.

$$Q_m = \frac{Q_P}{m_P} \quad (26)$$

$$Q_s = \frac{Q_P}{O_P} \quad (27)$$

Begrenzt wird die maximale Aufladung durch Spannungen, die zur Ionisation der Umgebung (z. B. Trägergasmedium) führen, und durch Erreichen der Durchbruchfeldstärke, bei der ein Abfließen der Ladungsträger einsetzt. Abhängig vom Druck wird die Durchbruchfeldstärke in [163] bei Atmosphärendruck mit etwa $2,6 \cdot 10^{-5}$ C/m² angegeben.

8.2.2.2 Abschätzung der Partikelaufladung

Bevor Simulationsarbeiten zur Qualifizierung des gewählten Mechanismus zur Pulverfokussierung durchgeführt werden können, sollen zunächst die theoretisch möglichen und experimentell realisierbaren Aufladungshöhen der Partikel betrachtet werden. Herangezogen werden hierzu die experimentell gewonnenen Daten, die im Rahmen zweier aktueller Arbeiten ermittelt worden sind [164,165] und im Folgenden weiterverarbeitet werden. In beiden Arbeiten handelt es sich um Daten, die die Partikelladung durch

Koronaaufladung in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers darstellen und anhand der folgenden erstellten Diagramme analysiert werden.

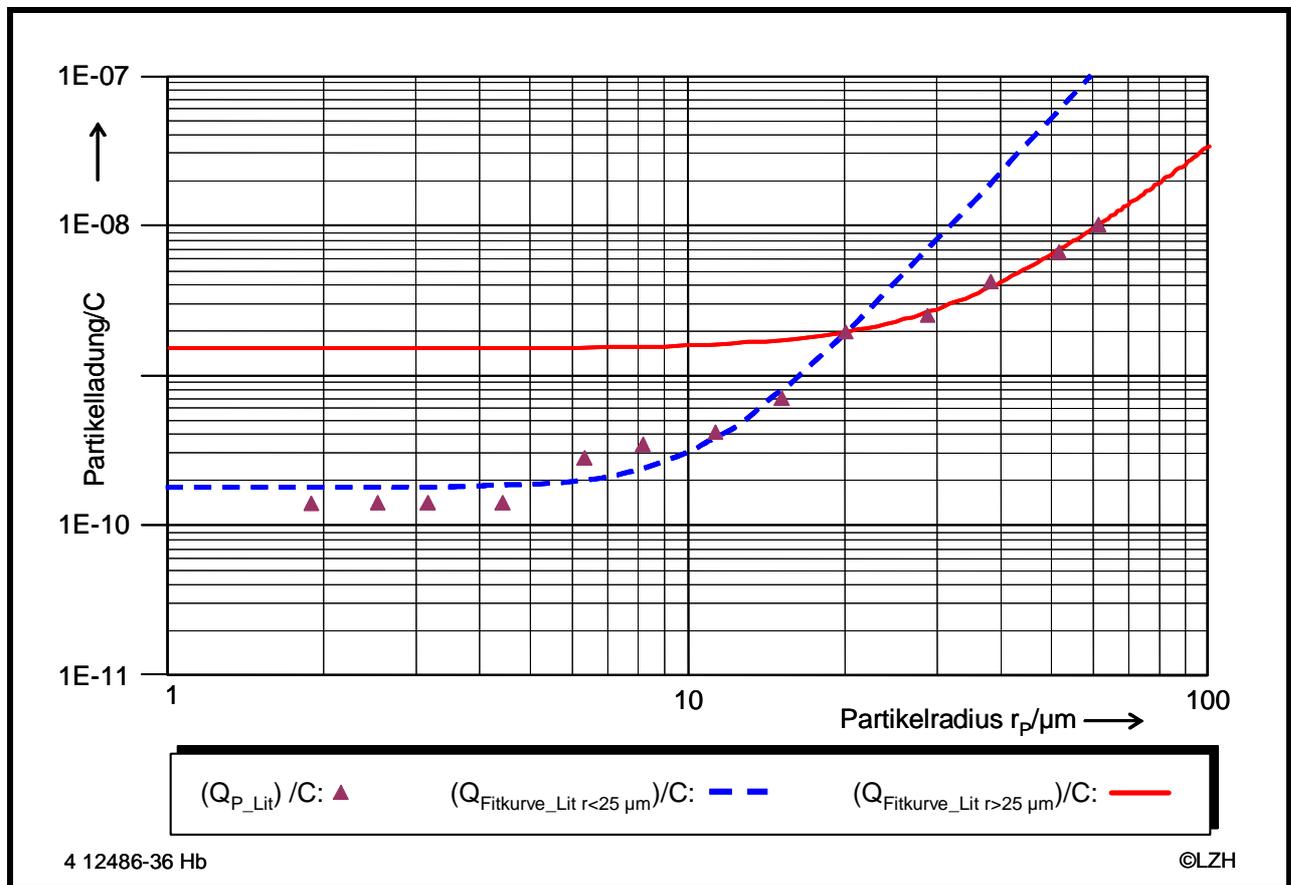


Abbildung 44: Experimentell ermittelte Ladungen und deren Annäherungskurven [164]

Abbildung 44 zeigt die ermittelten Ladungen in einem Partikelgrößenbereich bis 100 μm in doppelt logarithmischer Darstellung. Das gemessene Ladungsspektrum erstreckt sich hierbei über den Bereich zwischen 10^{-10} C für kleine Partikeldurchmesser bis 10^{-8} C für größere Partikeldurchmesser.

Es können qualitativ zwei Bereiche der funktionalen Abhängigkeit von Q_{P_Lit} unterschieden werden. Zum einen ein Bereich bis 25 μm , verdeutlicht durch die dargestellte blaue Annäherungskurve, und zum anderen ein Bereich größer 25 μm (rote Annäherungskurve). Für den zuletzt genannten Bereich bestätigt sich die allgemein beschriebene Proportionalität der Ladung zum Anstieg der Oberfläche. Ebenfalls bestätigt sich die bereits in anderen Arbeiten erwähnte Schwierigkeit, die Partikelaufladung in einem großen Partikelradiusbereich mit einer Funktion und hinreichend hoher Genauigkeit anzunähern.

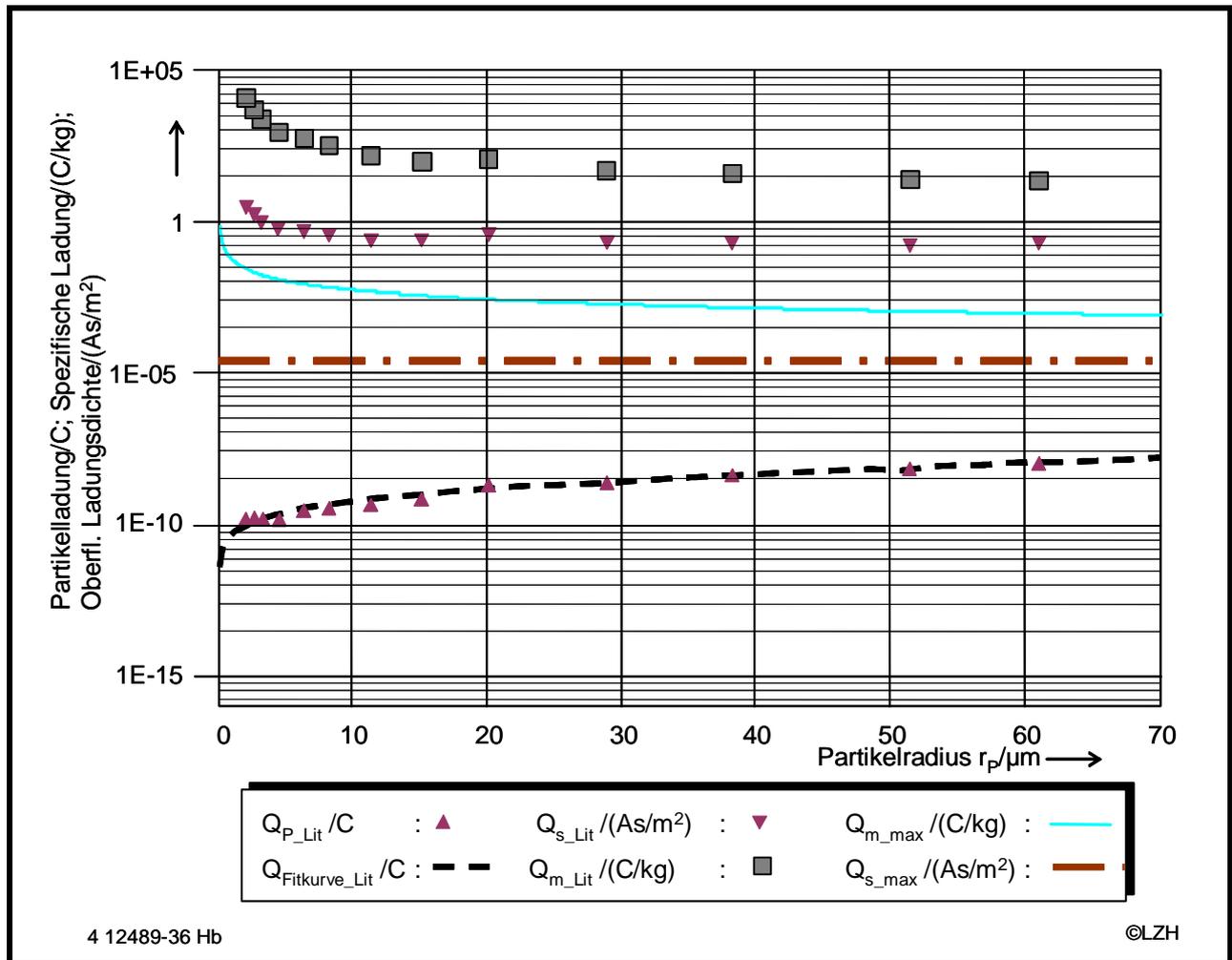


Abbildung 45: Spezifische Ladung und oberflächliche Ladungsdichte der Fitkurven

Abbildung 45 zeigt die experimentellen Daten in halblogarithmischer Darstellung, ergänzt um die daraus resultierenden Kurven für die eingeführte spezifische und oberflächliche Ladungsdichte. Zusätzlich eingetragen sind die Verläufe der theoretisch maximal erreichbaren oberflächlichen Leistungsdichte Q_{s_max} und der daraus resultierenden spezifischen Ladung Q_{m_max} , resultierend aus dem Wert der Durchschlagsfeldstärke, bei dem ein Abfließen der Ladungsträger stattfindet. Es fällt auf, dass die aus den experimentellen Daten der genannten Literaturstelle ermittelten Kurvenverläufe mehrere Zehnerpotenzen über den theoretisch maximal Erreichbaren liegen. Zur Überprüfung der Übereinstimmigkeit der beiden genannten Quellen erfolgt die Analyse einer weiteren verfügbaren Quelle in vergleichender Weise.

In der Abbildung 46 sind vergleichbar mit den Daten der ersten verwendeten Quellen die experimentell ermittelten Ladungen der zweiten verfügbaren Quelle in einem Partikelgrößenbereich bis 100 μm dargestellt.

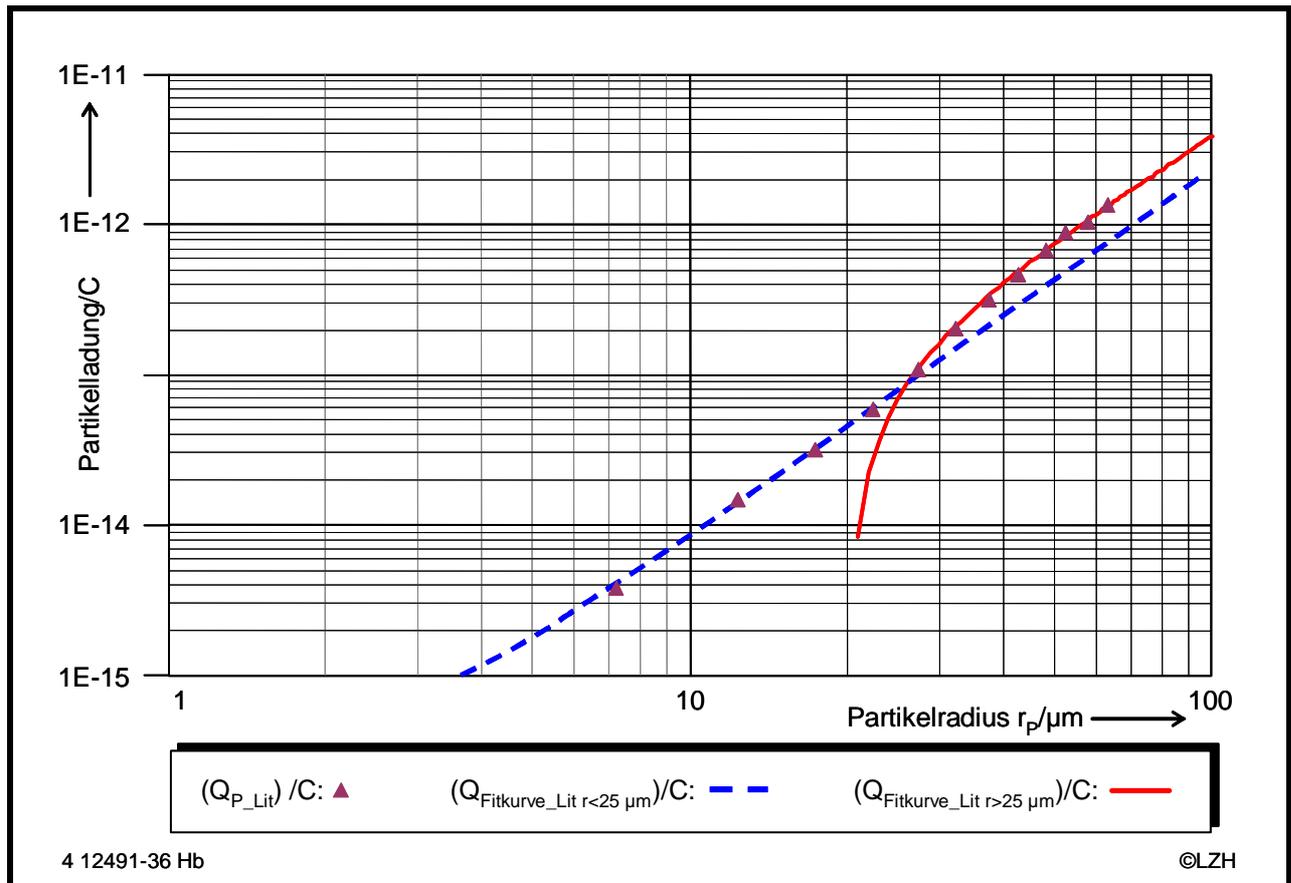


Abbildung 46: Experimentell ermittelte Ladungen und deren Annäherungskurven [165]

Auch diese Daten lassen die bereits o. g. Aufteilung in zwei Bereiche der funktionalen Abhängigkeit von Q_i zu. Auch hier kann die Aufteilung in einen Bereich bis $25 \mu\text{m}$, verdeutlicht durch die blaue Annäherungskurve, und einen Bereich größer $25 \mu\text{m}$ (vgl. rote Annäherungskurve) dargestellt werden.

Ein eklatanter Unterschied zwischen den Daten der beiden analysierten Quellen ergibt sich jedoch bei Betrachtung des gemessenen Ladungsspektrums, welches bei letzterer Quelle in einem Bereich zwischen 10^{-15} Coulomb für kleine Partikelgrößen und bis zu 10^{-12} Coulomb für größere Partikeldurchmesser liegt.

Werden auch diese Daten in eine halblogarithmische Darstellung übertragen, zusätzlich die spezifische Ladung und die oberflächliche Ladungsdichte errechnet und durch die Ladungskurven der bereits im Vorfeld genannten Durchschlagsfestigkeit ergänzt, dann ergibt sich eine Darstellung nach Abbildung 47.

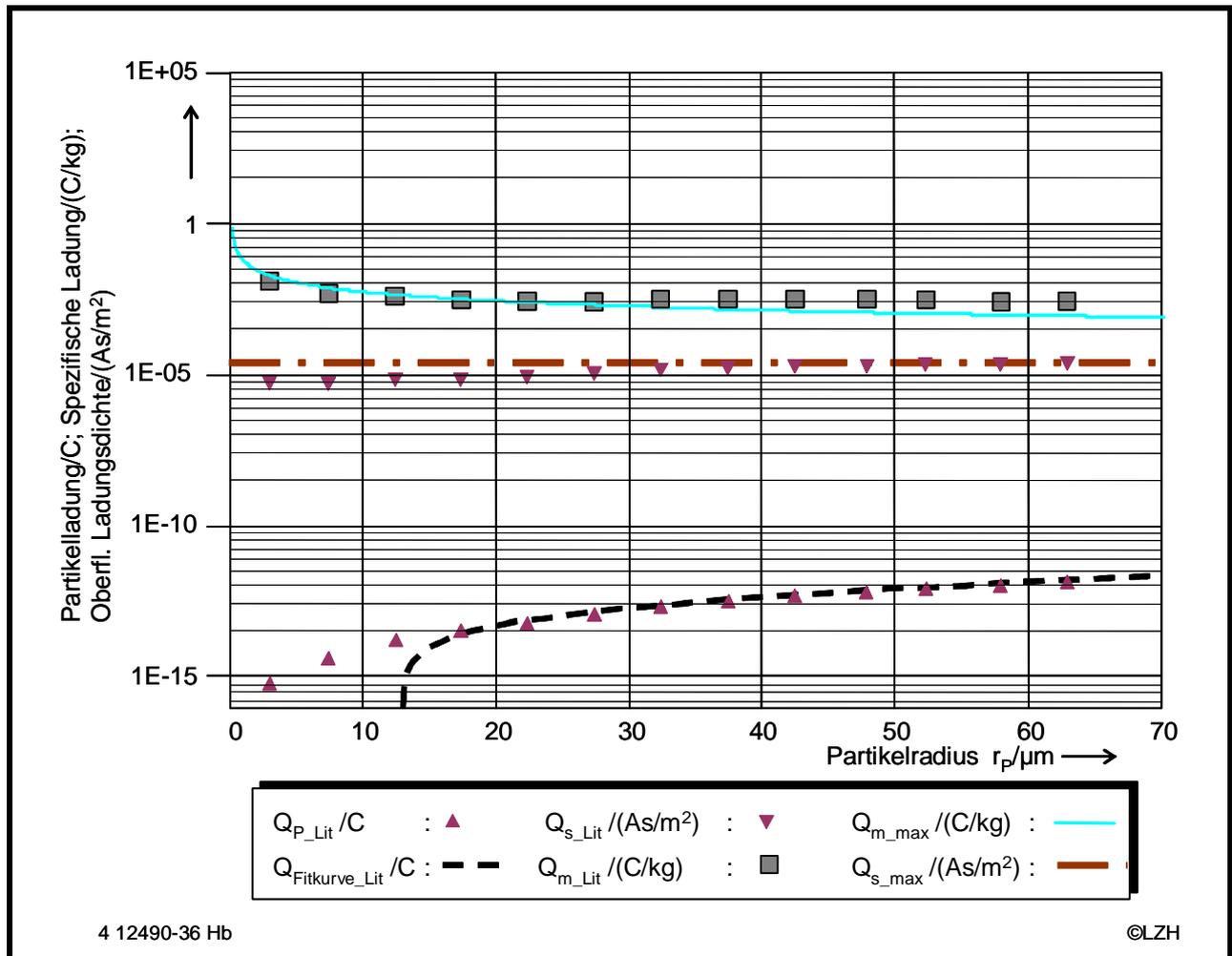


Abbildung 47: Spezifische Ladung und oberflächliche Ladungsdichte der Fitkurven [165]

Im Gegensatz zu den in den ersten Quellen ermittelten Daten zeigen die aus dieser Quelle stammenden Daten eine vergleichsweise gute Übereinstimmung mit den theoretisch erreichbaren Partikelladungen. Lediglich im Bereich größerer Partikeldurchmesser übersteigen die gemessenen Werte die theoretisch maximal erreichbaren Ladungswerte.

Die stark variierenden experimentellen Ergebnisse zeigen deutlich, dass das Phänomen der Aufladung, und vor allem deren eindeutige Detektion, noch immer als problematisch anzusehen ist. Da davon auszugehen ist, dass die Aufladungshöhe einen signifikanten Anteil innerhalb der Partikelstrahlformung einnimmt, sind Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen unterschiedlicher Aufladungszustände Bestandteil der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsarbeiten.

8.2.2.3 Manipulation der geladenen Partikel

Aufgabe der Fokussierung ist es, die im Allgemeinen divergent auseinander laufenden Bestandteile eines Teilchenfreistrahles wieder in einen begrenzten Bereich zusammenzuführen. Abhängig vom Ladungszustand, der Geschwindigkeit und dem Gewicht der

Partikel ist eine effektive Manipulationsmethode zu wählen. Im Vergleich zu den Neutralpartikeln, deren Bewegungsrichtung vorwiegend von der Gravitation und der kinetischen Energie des Fördergases bestimmt wird, sind für geladene Partikel zusätzlich das elektrische und das magnetische Feld mögliche Einflussgrößen auf die Bewegungsrichtung. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Manipulation der Bewegungsrichtung durch die elektrische Feldkraft untersucht.

Denkbar ist die Ausnutzung der Feldkraft im angedachten Anwendungsfall durch die Integration zweier gegenüberliegender Potentialflächen unterschiedlicher Belegung, zwischen denen der zu fokussierende laminare Partikelstrahl verläuft.

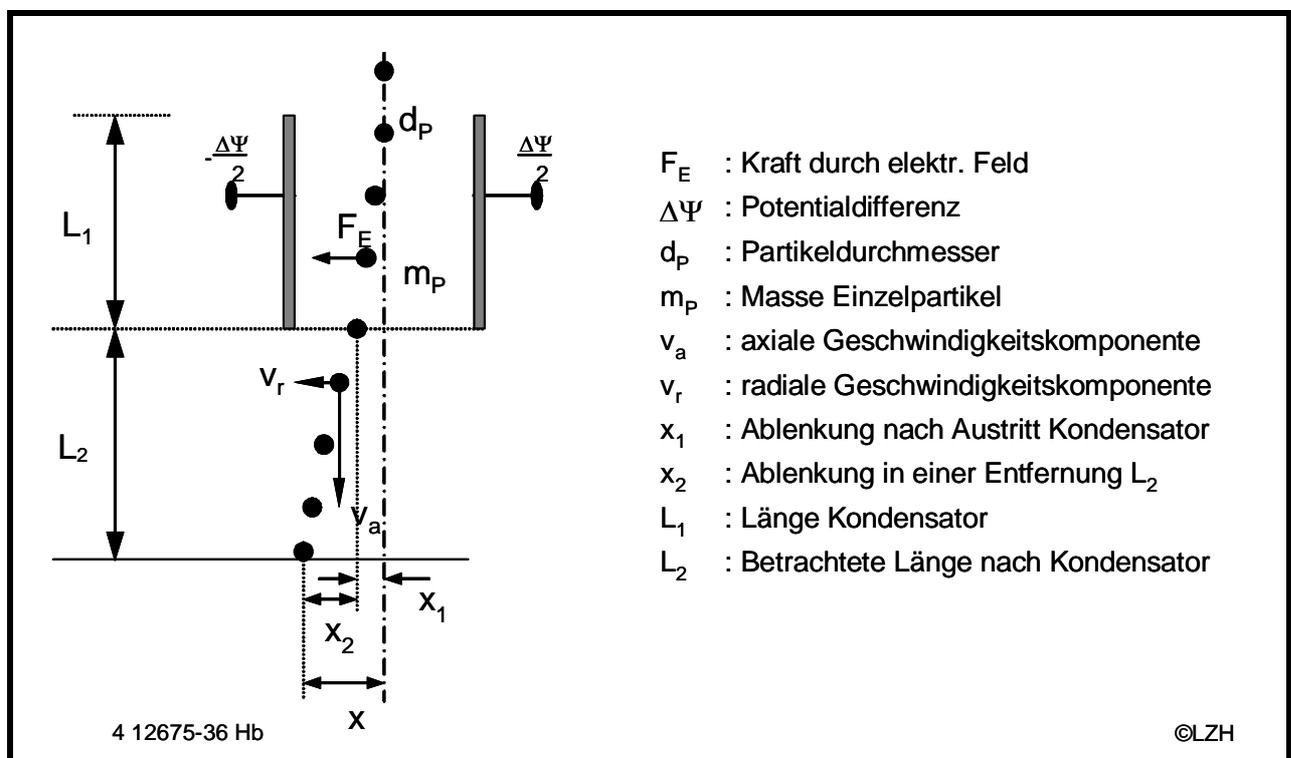


Abbildung 48: Ablenkung eines Partikels beim Passieren eines Kondensators

Bei dieser Anordnung erfahren die Partikel beim Durchlaufen des durch die Potentialflächen erzeugten elektrischen Feldes eine konstante Kraft F_E , die von der Ladung Q_P des Partikels, der Potentialdifferenz $\Delta\Psi$ und dem Partikeldurchmesser d_P abhängt:

$$F_E = \frac{Q_P \Delta\Psi}{d_P} \quad (28)$$

Diese Kraft beschleunigt die Partikel mit der konstanten Beschleunigung a_E , die sich aus dem Quotienten der Kraft F_E und der Partikelmasse m_P ergibt. Unter Hinzuziehung der Zeit, die das Partikel zum Durchqueren des durch die Potentialflächen hervorgerufenen

elektrischen Feldes benötigt, ergibt sich die hervorgerufene örtliche radiale Abweichung nach Verlassen des Einflussbereiches der Potenzialflächen zu:

$$x_1 = \frac{1}{2} a_E t^2 = \frac{1}{2} \frac{Q_P \Delta \Psi}{d_P m_P} \left(\frac{L_1}{v_a} \right)^2 \quad (29)$$

Die Partikel bewegen sich hierbei mit der radialen Geschwindigkeit:

$$v_r = a_E t = \frac{Q_P \Delta \Psi}{d_P m_P} \frac{L_1}{v_a} \quad (30)$$

Bei Betrachtung der radialen Abweichung nach dem Durchlaufen einer Strecke L_2 ergibt sich durch die radiale Geschwindigkeitskomponente die örtliche Gesamtabweichung unter Berücksichtigung der zusätzlichen Abweichung x_2 zu:

$$x_{\text{ges}} = x_1 + x_2 = \frac{1}{2} \frac{Q_P \Delta \Psi}{d_P m_P} \left(\frac{L_1}{v_a} \right)^2 + \frac{Q_P \Delta \Psi}{d_P m_P} \frac{L_1 L_2}{v_a^2} \quad (31)$$

Im Kapitel 8.2.3 „Simulationen der Partikelbewegung“ wird basierend auf den Ausführungen zur Beeinflussung der Partikelflugbahn untersucht, inwieweit die externen Kräfte des induzierten elektrischen Feldes durch die Integration von Potentialflächen in der dargestellten Art in der Lage sind, einen Partikelstrahl in der geforderten Qualität zu fokussieren. Hauptaugenmerk wird innerhalb der Arbeiten auf einen in seinen Dimensionen der Strahl-Material-Wechselzone angepassten Partikelfokus liegen, durch den der innerhalb der aerodynamischen Partikelfokussierung notwendige hohe volumetrische Anteil der dispersen Phase stark verringert werden kann. Durch die hierdurch resultierende nahezu vollständige Einbringung der Zusatzwerkstoffpartikel in das Schmelzbad wird erwartet, dass die im Abschnitt 8.1 gezeigten Effekte der unerwünschten Strahlungsabsorption und deren Folgen vollständig kompensiert werden.

8.2.3 Simulationen der Partikelbewegung

Ziel der Modellierung und der numerischen Simulation ist es, die Flugbahnen der elektrisch geladenen Partikel beginnend vom Eintritt in die zu entwickelnde Fokussierungseinheit über deren Wechselwirkung mit dem elektrischen Feld und dessen Auswirkungen zu simulieren und die daraus gewonnenen Ergebnisse für die weitere Optimierung der Fokussierungseinheit zu nutzen.

Für die Simulation elektrischer Felder ist im Rahmen dieser Arbeit die Software OPERA-3d der britischen Firma Vektor Fields eingesetzt worden. Das Programmpaket besteht aus

den Teilen Preprozessor, Simulator und Postprozessor. Der Preprozessor dient zur Erzeugung der Modellgeometrie und zur Definition der Modell- und Materialeigenschaften. Für die Feldsimulation bietet Vektor Fields eine Vielzahl von Simulatoren an. Im Rahmen dieser Arbeit ist ausschließlich der Simulator TOSCA benutzt worden, der für magnetische Felder optimiert worden ist, sich jedoch auch für die Berechnung von elektrischen Feldern eignet. Die wesentliche Einschränkung in Hinsicht auf Flugbahnberechnungen in elektrischen Feldern ist die fehlende Berücksichtigung von Raumladungsphänomenen. Die Analyse der berechneten Felder wird mit dem Postprozessor vorgenommen. Zur Kombination der Simulationssoftware mit anderen Anbietern bietet Vektor Fields die Verknüpfung über sogenannte „table files“ an. Für die Berechnung von elektrischen Feldern ist es zunächst notwendig, einen Hintergrund zu definieren, der die Modellumgebung beschreibt. Er sollte einerseits so groß sein, dass das Feld an seiner Grenze mit hinreichender Genauigkeit als nicht mehr vorhanden angenommen werden kann, andererseits aber auch so klein wie möglich, damit der notwendige Rechenaufwand minimiert werden kann. Zur weiteren Minimierung des Rechenaufwandes sind innerhalb der in den folgenden Abschnitten erläuterten Modelle lediglich besonders sensitive Bereiche feiner vermascht worden.

Bevor auf Einzelheiten der innerhalb der Modelle berechneten Partikelflugbahnen in den folgenden Abschnitten eingegangen wird, wird zunächst die Strahldefinition näher erläutert. Neben der Eingabe der Einzelschrittlänge der Flugbahnberechnung erlaubt der Preprozessor die Eingabe der Summe der Einzelschritte, welches zugleich die zu berechnende Gesamtflugbahnlänge festlegt. Die eigentliche Flugbahnberechnung erfolgt basierend auf den Eigenschaften Partikelmasse, Partikelladung und kinetische Energie der Partikel beim Eintritt in die Modellumgebung. Die Berücksichtigung der Partikelmasse erfolgt in Elektronenruhemassen, die Eingabe der Partikelladung anhand der Anzahl der Elektronenladungen. Die Anzahl der Strahlbündel und der Ort der Partikelaufgabe kann beliebig gewählt werden.

Für die Beurteilung der Berechnungsergebnisse können neben Feldstärkeverläufen innerhalb des Gesamtmodells oder innerhalb besonders interessierender Schnittflächen auch Feldstärkehistogramme, Äquipotentiallinienverläufe und Darstellungen der Verschiebungsdichte zur Auswertung der Berechnungsergebnisse herangezogen werden. Zur Qualifizierung der Partikelflugbahnen werden in dieser Arbeit vornehmlich y -, z -Diagramme verwendet, die den Durchtritt des Strahlbündels durch die Rotationsachse z und der senkrecht auf dieser stehenden Achse y beschreiben und die im Folgenden noch näher erläutert werden.

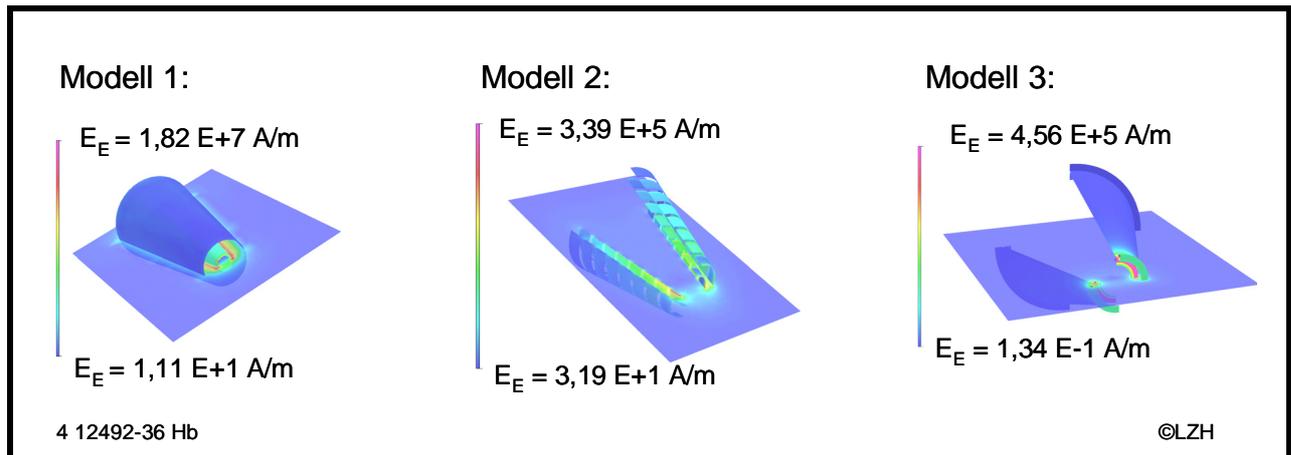


Abbildung 49: Entwicklungsstadien der entwickelten Modelle

Die Flugbahnberechnungen erfolgen basierend auf den Materialdaten des im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendeten Stahlpulvers 1.4404. Der für die Berechnungen gewählte Partikeldurchmesser beträgt einheitlich einen Mikrometer, woraus sich unter Verwendung einer Dichte von 7980 kg/m^3 eine Partikelmasse von $4,18 \cdot 10^{-15} \text{ kg}$ pro Partikel ergibt. Die für die Berechnungen gewählte Anfangsgeschwindigkeit der Partikel darf 1 m/s nicht unterschreiten, da dies der experimentell ermittelten minimalen Trägergasgeschwindigkeit entspricht, bei der sich die Partikel im angegebenen Partikelgrößenbereich gerade noch fördern lassen.

In der Abbildung 49 sind die wesentlichen Entwicklungsstadien mit exemplarischer Darstellung der Feldstärke innerhalb der untersuchten Modelle abgebildet, die im Folgenden näher erläutert werden. Der allen Modellen zugrunde liegende Partikelbeeinflussungsmechanismus ist die im Abschnitt 8.2.2 „Elektrostatische Partikelfokussierung“ erläuterte Feldkraft.

8.2.3.1 **Modell 1: Ganzflächenpotentialpaarung**

In Anlehnung an die innerhalb der Versuchsdurchführung verwendete koaxiale Düse ist für erste Simulationsarbeiten ein Modell gewählt worden, das den geometrischen Verhältnissen der o. g. Düse weitestgehend entspricht. Gewählt worden ist dieser Ansatz mit dem Ziel, zunächst eine Art Vorfokussierung der Partikel aufgrund des aerodynamischen Strömungsfeldes zu erreichen und das elektrische Feld lediglich zur Feinfokussierung der Partikel zu nutzen. Das Modell besteht aus zwei konzentrischen Trichtern zwischen denen das partikelbeladene Trägergas geführt wird. Zur Erzeugung des elektrischen Feldes fungieren die als Potentialflächen ausgelegten Trichteroberflächen. Das Außenpotential liegt hierbei an den Innenflächen des Außentrichters und dementsprechend das Innen-

potential an der Außenfläche des Innentrichters. Zur Verdeutlichung sind in der Abbildung 50 der prinzipielle Aufbau und die wesentlichen geometrischen Verhältnisse dargestellt.

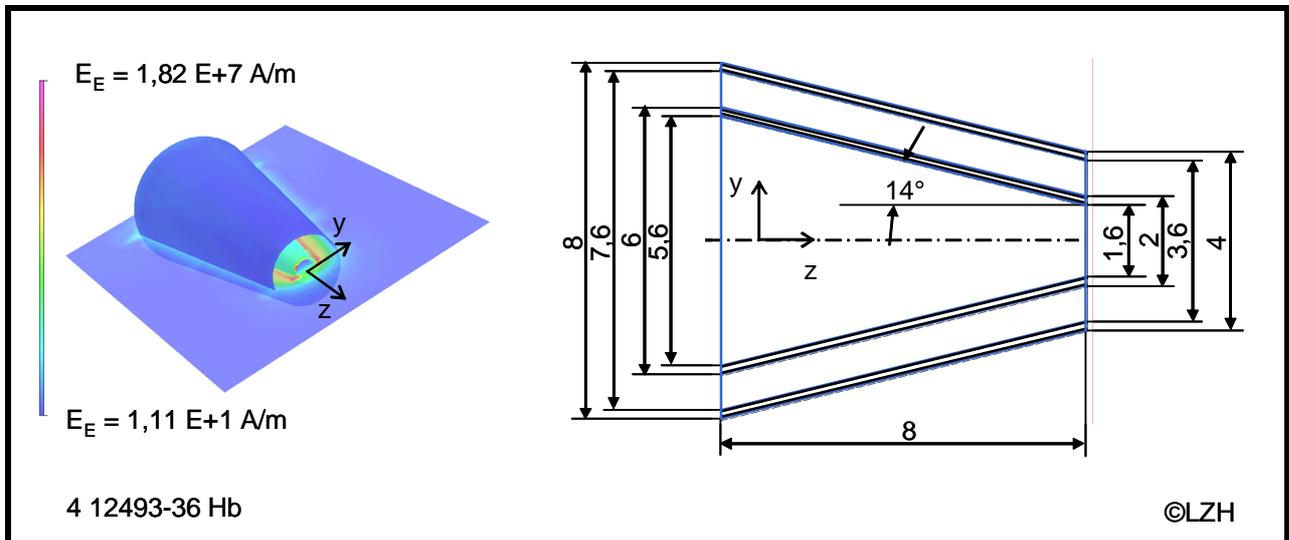


Abbildung 50: Modell 1

Der Eintritt der Partikel in das Modell und die Festlegung der Startrichtung erfolgt hierbei parallel zu den Trichterwänden unter Angabe der genannten notwendigen Eigenschaften in Form der Randbedingungen. Zur Erweiterung der Berechnungen von Einzelpartikeln auf Partikelstrahlbündel erfolgt eine Aufteilung des Strömungskanals zwischen Außen- und Innentrichter, wodurch im vorliegenden Modell ein Strahlenbündel von sechzehn Einzelpartikeln entsteht. Aufgrund der Festlegung auf ein Referenzpartikel mit konstantem Durchmesser bleiben als zu variierende Größen die kinetische Energie der Partikel, die Partikelladung sowie das entstehende elektrische Feld. Als Qualifizierungsgrundlage der durch das angelegte elektrische Feld beeinflussten Partikelbahnen dienen Berechnungen von Strahlenbündeln hoher Geschwindigkeit bei spannungsfreien Potentialen, welche die Partikelflugbahn ohne Beeinflussung durch ein elektrisches Feld zeigen und damit für die Qualifizierung der durch das elektrische Feld hervorgerufenen Ablenkungen herangezogen werden können.

In der Abbildung 51 sind exemplarisch berechnete Partikelflugbahnen dargestellt. Die Abszisse der kartesischen Koordinatenachse entspricht hierbei der Rotationsachse des Modells, welche bei Partikeleintritt in das Fokussierungsmodul durch die Koordinate „0“ gekennzeichnet ist. Die Ordinate entspricht der auf der Rotationsachse senkrecht liegenden Geometrieachse. Die Partikelflugbahnen stellen den Abstand der Partikel von der Rotationsachse dar, wobei nur positive y-Koordinaten dargestellt werden. Die von der Abszisse weglaufenden Strahlen entsprechen daher den rotationssymmetrischen Partikelstrahlen der gegenüberliegenden Seite.

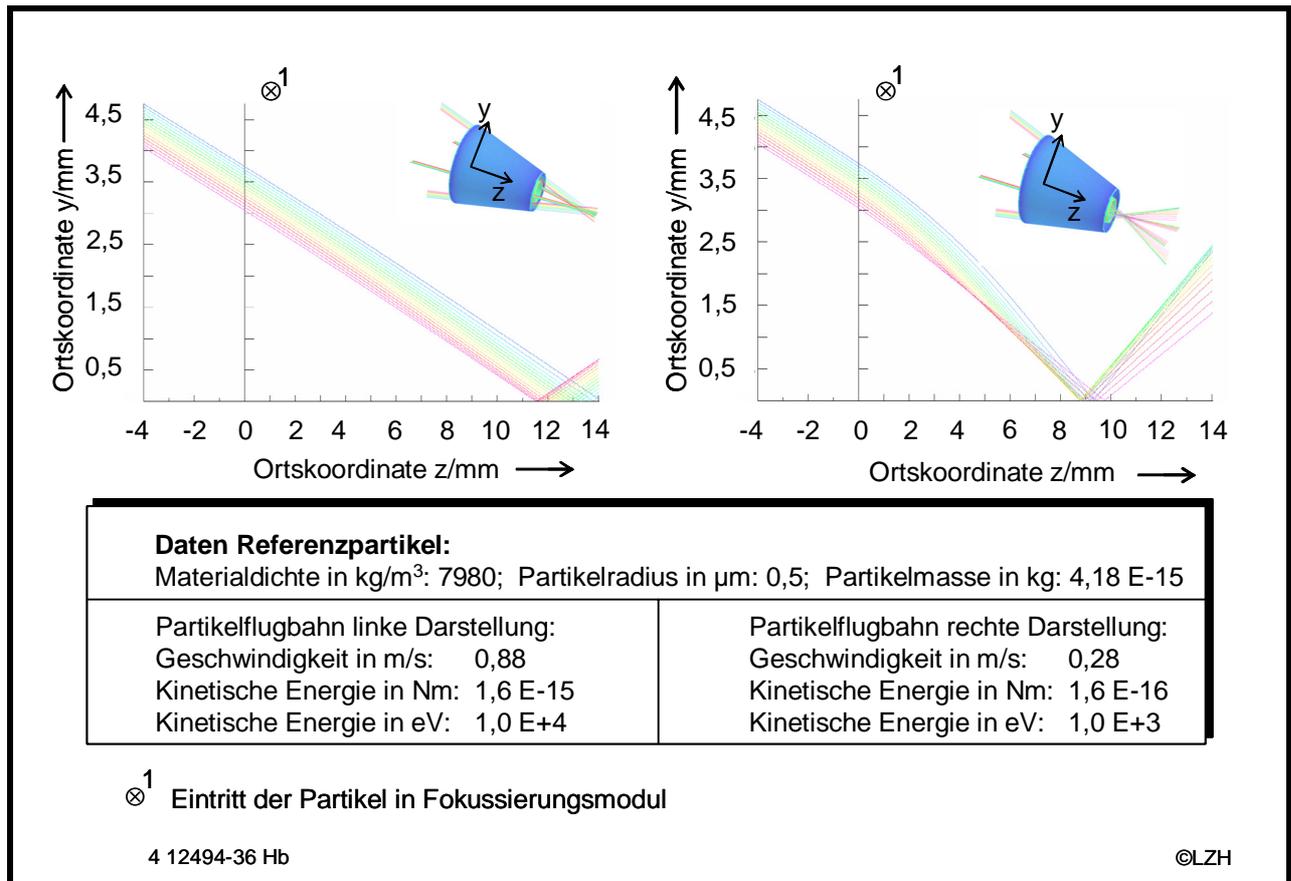


Abbildung 51: Partikelflugbahnen von Modell 1 bei variierenden Randbedingungen

Im linken Teil der Abbildung 51 handelt es sich um die beschriebene Qualifizierungsgrundlage, bei der die Partikelgeschwindigkeit so hoch gewählt wird, dass die Partikel lediglich durch das aerodynamische Strömungsfeld beeinflusst werden. Der Durchtritt der Partikel durch die Rotationsachse des Modells erfolgt im Bereich von 11,5 bis 14,1 mm. Wird dieser Achsenabschnitt auf die Rotationssymmetrie der Strahlenbündel projiziert, kann ein Partikelfokusdurchmesser im Bereich von $400 \mu\text{m}$ ermittelt werden, welcher sich anhand der Ausführungen im Kapitel „Aerodynamische Pulverfokussierung“ auch experimentell bestätigen lässt. Durch Anlegen einer Spannung an die Potentialflächen verändert sich aufgrund der zusätzlichen auf das Partikel wirkenden Feldkraft dessen Flugbahn. Im rechten Teil der Abbildung 51 handelt es sich um die durch Variation der Partikelgeschwindigkeit hinsichtlich der Fokusabmessungen optimierten Flugbahnen. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass der Fokusdurchmesser im Vergleich zur linken Darstellung um nahezu die Hälfte verringert werden konnte, welches das innerhalb der elektrostatischen Partikelfokussierung liegende Potential verdeutlicht. Eine wesentliche Leistungssteigerung ist aufgrund der Einfachheit des Modells und den damit nur begrenzt vorhandenen lokalen Einflussmöglichkeiten auf das elektrische Feld nicht möglich.

8.2.3.2 Modell 2: Mehrfachsegmentpotentialpaarung

Die Umsetzung der innerhalb des ersten Modells erlangten Erfahrungen führt zu einem modifizierten Modell, bei dem insbesondere auf flexiblere Einstellungsmöglichkeiten der zu erzeugenden Feldlinienverläufe geachtet worden ist. Zu diesem Zweck erfolgt die Unterteilung der beim ersten Modell über die gesamte Trichteroberfläche geschlossenen Potentialfläche in mehrere kleinere. Das Resultat sind acht sich gegenüberliegende Potentialpaare, denen individuell unterschiedliche Spannungen zugeordnet werden können, wobei das Modell unter Beachtung der technischen Realisierbarkeit erstellt worden ist. Eine exemplarische Feldstärkeverteilung des berechneten Fokussierungsmoduls und die geometrischen Verhältnisse des Moduls sind in der Abbildung 52 dargestellt.

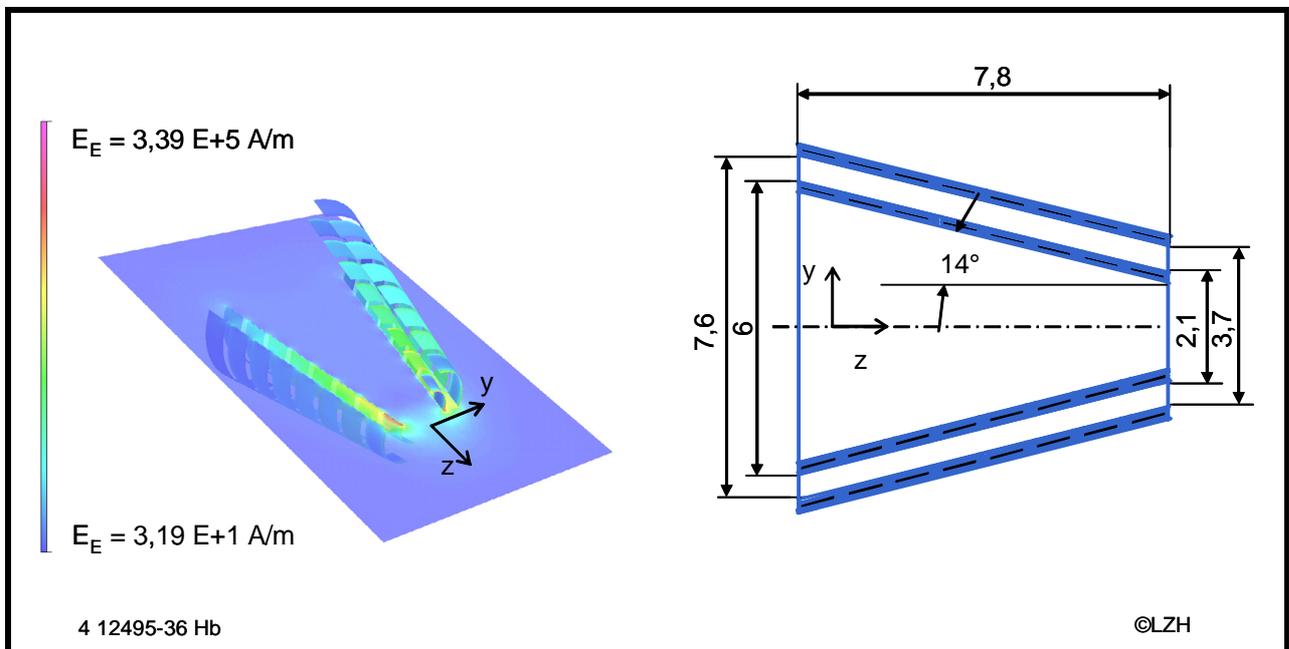


Abbildung 52: Modell 2

Zur Abschätzung der Fokussierungsmöglichkeiten mit diesem Modell wurden umfangreiche Berechnungen von aus Referenzpartikeln bestehenden Partikelstrahlbündeln durchgeführt. Innerhalb der durchgeführten Reihenuntersuchungen unterschiedlicher Potentialbelegungen ist insbesondere im Hinblick auf die technische Realisierbarkeit darauf geachtet worden, die bei den verwendeten Werkstoffen angegebenen Herstellerangaben (max. Stromdichte, Durchschlagfestigkeit der Isolierwerkstoffe etc.) einzuhalten. Neben den Untersuchungen hinsichtlich der Flugbahnänderungen, hervorgerufen durch die gewählten Potentialbelegungen, wurden erste Eindrücke der Auswirkungen von Geschwindigkeitsänderungen gesammelt.

Begonnen wurden die Untersuchungen mit variierenden Komplettbelegungen aller Potentialflächen, wobei die angelegte Spannung zum Düsenausgang systematisch gesteigert worden ist. Ziel dieses Ansatzes war eine sukzessive Steigerung der Flugbahnkrümmung der Einzelpartikel bis hin zum gewünschten Bahnverlauf. Ein exemplarisches Resultat der Berechnungen ist in der Abbildung 53 dargestellt.

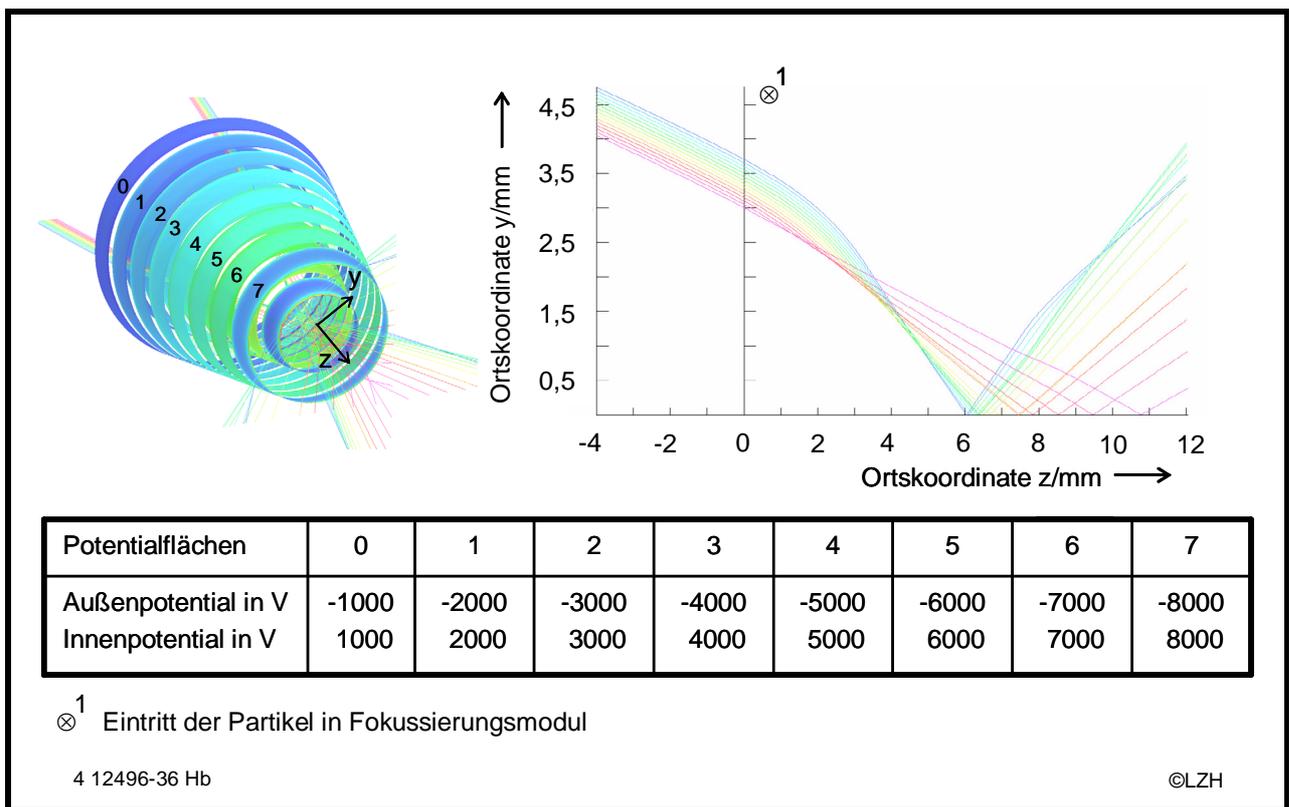


Abbildung 53: Partikelflugbahnen von Modell 2 bei Belegung aller Potentiale

Das Bild zeigt die Potentialflächen und den durch das elektrische Feld hervorgerufenen Partikelstrahlenverlauf von vier berechneten Strahlenbündeln. Zur Qualifizierung des erzeugten Strahlenverlaufs ist zusätzlich ein y-, z-Diagramm dargestellt, welches die genaue Feststellung der hervorgerufenen Änderungen erlaubt. Da innerhalb der Berechnungen mechanische Grenzen nicht berücksichtigt werden, sind zur Auswertung der Ergebnisse immer beide Darstellungen notwendig.

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse zeigt, dass der Einfluss der von den Partikeln beim Eintritt in das Modell passiertten Potentialpaare so stark ist, dass das Strahlenbündel bereits in der Düsenmitte die z-Achse durchläuft. Folge dieses Verlaufs ist der Durchtritt der Partikelstrahlen durch die Potentialflächen, wobei der Ort des Durchtrittes vom Abstand der Partikel im jeweiligen Strahlenbündel von den Potentialflächen abhängig ist.

Auch die Reduzierung der belegten Potentialpaare auf die Paare 4-7 (vgl. Abbildung 54, linke Darstellung) mit dem Ziel, zum einen den Beginn der Flugbahnkrümmung zum Düsenaustritt hin zu verlagern und zum anderen den Ort der maximalen Verengung auf die Rotationsachse der Düse zu verlagern, führte zwar noch nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen, bestätigte jedoch tendenziell die getroffenen Annahmen.

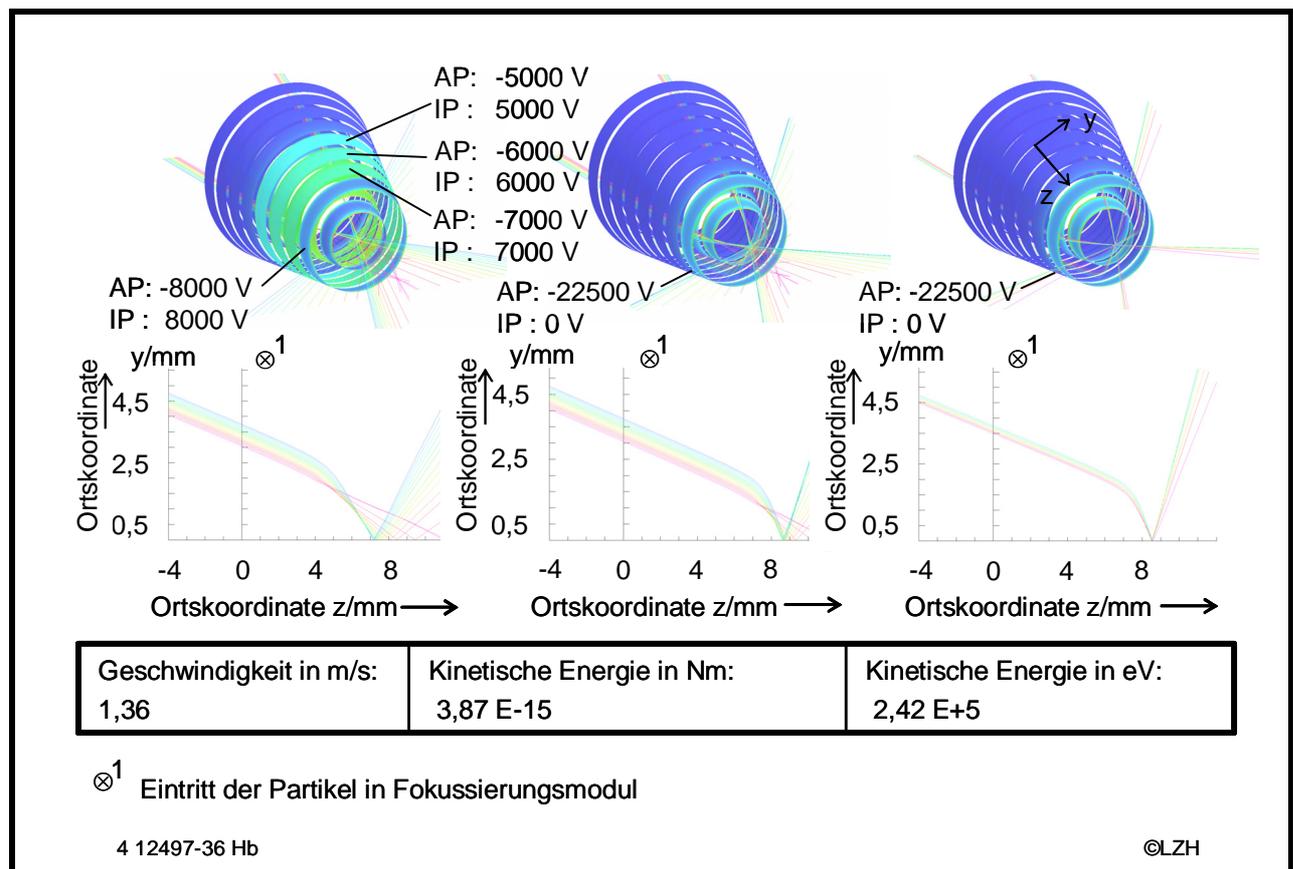


Abbildung 54: Partikelflugbahnen von Modell 2 bei Minimierung der Anzahl der belegten Potentialpaare

Erst durch das Ausschalten der Potentialflächen 0-6 und einer Belegung des Potentialpaares 7 mit einer negativen Spannung am Außenpotential sowie der Erdung des Innenpotentials konnte eine überwiegende Verlagerung der Partikelbahnen in den Außenbereich der Düse bewirkt werden (vgl. Abbildung 54, mittlere Darstellung). Weiteres Optimierungspotential zur Kompensation der Partikelflugbahnen innerhalb der zuletzt beschriebenen Belegung besteht in einer modifizierten Auslegung des Strömungskanals und einer damit verbundenen Verkleinerung der Ausdehnung des Partikelstrahlenbündels (vgl. Abbildung 54, rechte Darstellung). Durch Reduzierung des für die angestrebten Partikelstrahlfokussierungsdurchmesser ohnehin sehr groß gewählten Strömungskanals konnten in einem weiteren Modell auch diese Defizite kompensiert werden.

8.2.3.3 Modell 3: Einfachsegmentpotentialpaarung

Neben der Optimierung der Strömungskanalgeometrie war die Modifizierung der Potentialflächen Gegenstand des nächsten Iterationsmodells. Im Mittelpunkt standen hierbei die Auswirkungen der Partikelstrahlenverläufe bei Ersatz der im Querschnitt rechteckförmigen Potentialflächen durch runde Geometrien sowie die örtliche Anordnung derselben. Berechnungsgrundlage stellte hierbei zunächst die in der Abbildung 55 (linke Darstellung) zu erkennende Geometrie dar. Der Strömungskanal ist gemäß der Ausführungen im Abschnitt Modell 2 auf 0,2 mm freier Strömungsquerschnitt unter Veränderung des Strömungswinkels reduziert worden. Hieraus ergibt sich eine freie Strömungslänge von 12 mm. Die rechteckförmigen Potentialflächen sind ersetzt worden durch Potentialringe mit einem Durchmesser von 0,1 mm, wobei das Innenpotential im Vergleich zum Außenpotential in Richtung Düseneingang versetzt worden ist.

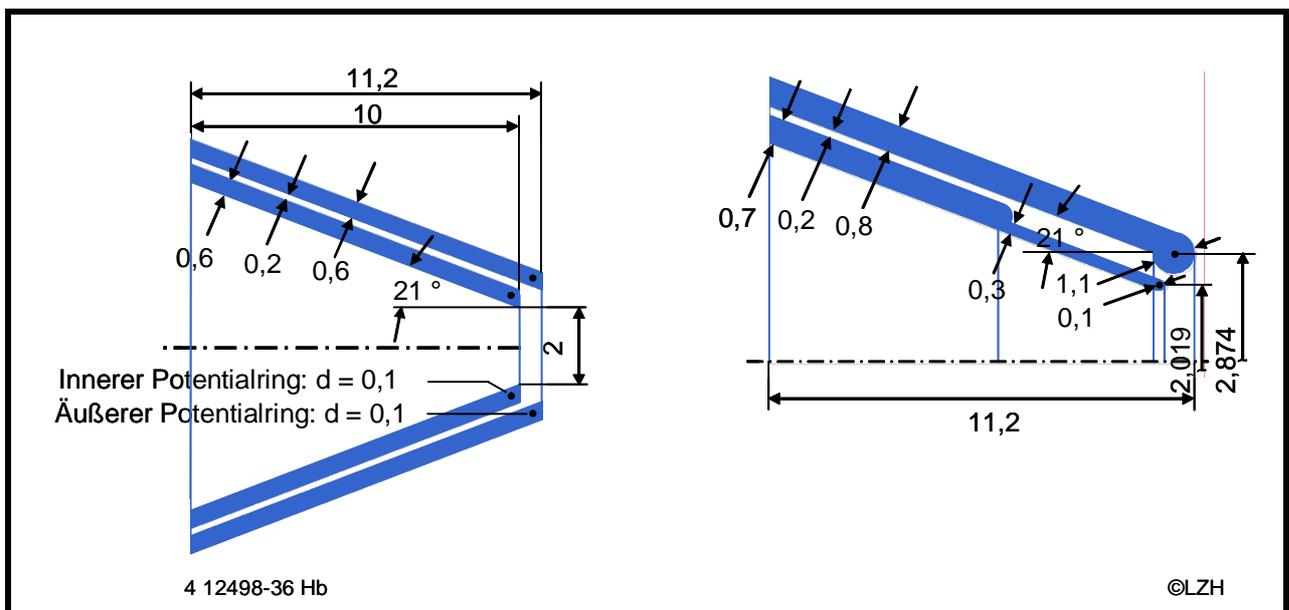


Abbildung 55: Modell 3 mit modifizierten Modellgeometrien

Die Berechnungen bestätigten, dass die Belegung lediglich eines am Düsenausgang gelegenen Potentialpaares die angestrebten Partikelflugbahnbeeinflussungen in ausreichender Form ermöglichen. Zwar bedingten die Geometrieänderungen innerhalb der Potentialflächen eine erneute Anpassung der Belegung derselben, liegen jedoch noch innerhalb der für die gewählten Isolationswerkstoffe angegebenen Durchschlagfestigkeit. Als immer noch problematisch zeigte sich jedoch die bereits innerhalb der Düse auftretende Partikel-Wand-Kollision der auf der Innenfläche der Düse verlaufenden Partikelstrahlen. Kompensiert werden konnte dieses Defizit mit einer weiteren finalen Anpassung der Strömungskanalgeometrie. Die Anpassung erfolgte zunächst durch eine Beibehaltung

des freien Strömungsquerschnittes und einer im weiteren Strömungsverlauf angeordneten Aufweitung des freien Strömungsquerschnittes um den Faktor drei (vgl. Abbildung 56, rechte Darstellung). Neben der Optimierung des Strömungskanals erfolgte die geometrische Auslegung der Isolationsmaterialien entsprechend der Höhe der Potentialpaarbelegung, welche eine Spannungsbeaufschlagung von -50 kV am Außenpotential und das Anlegen von Erdpotential auf dem Innenpotential berücksichtigt (vgl. Abbildung 56, rechte Darstellung).

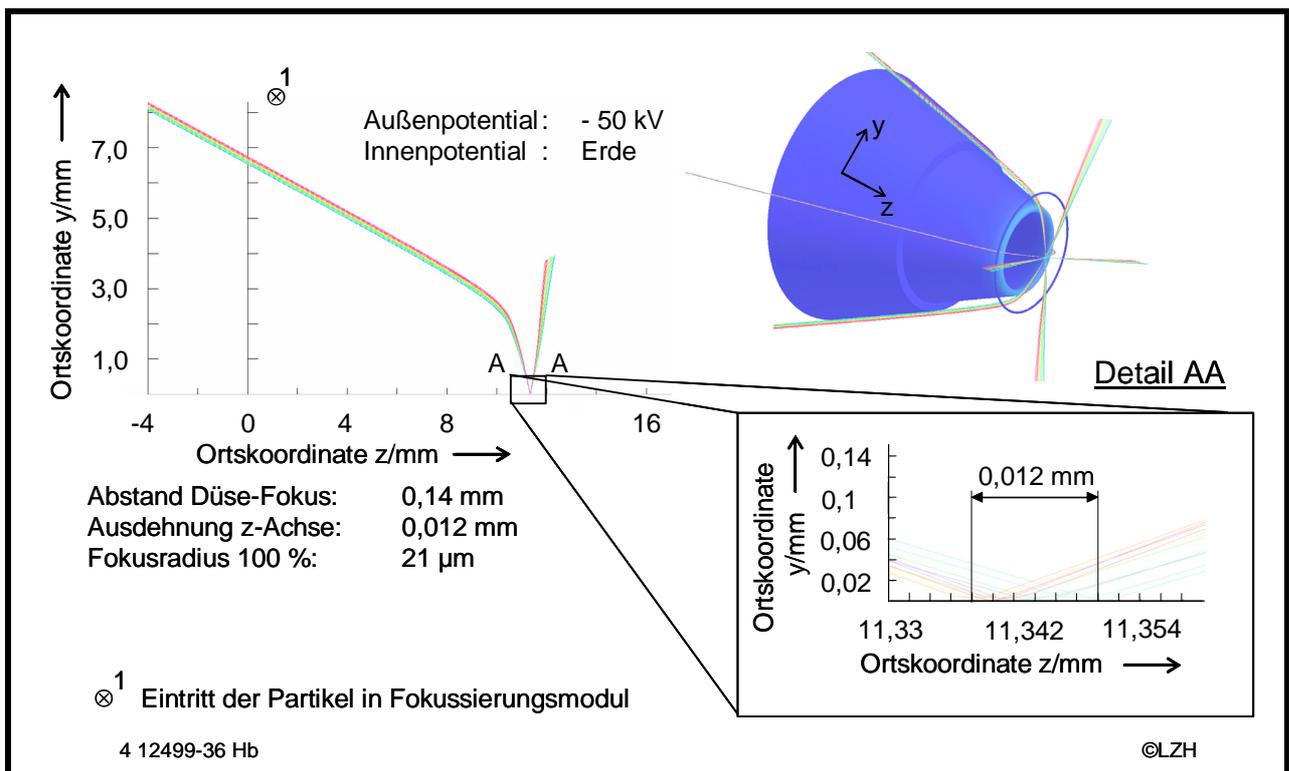


Abbildung 56: Partikelflugbahnverläufe des optimierten Modells

In Abbildung 56 ist das y-, z-Diagramm der Partikelflugbahnen des optimierten Modells abgebildet. Zur besseren Verdeutlichung der geringen Fokusabmessungen sind diese vergrößert dargestellt und durch eine Modellansicht ergänzt worden. Aus dem Bild wird ersichtlich, dass der Partikelfokus ausgehend von den im ersten Modell erreichten $400\text{ }\mu\text{m}$ im Laufe der Optimierungsstufen der Modelle annähernd um den Faktor zehn verringert werden konnte. Die Ausdehnungen des Partikelstrahlbündels betragen auf der Rotationsachse unter Berücksichtigung aller Partikelstrahlen nach der Optimierung lediglich $0,012\text{ }\mu\text{m}$ und ergeben durch Projektion der Verläufe auf die auf der Rotationsachse senkrecht stehende Achse einen Partikelfokusdurchmesser von lediglich $42\text{ }\mu\text{m}$ bei einem Fokusabstand gemessen zum Außenpotential von nur $0,14\text{ mm}$. Bei Beschränkung auf lediglich 80 % der Partikelstrahlen beträgt der erreichte Fokusdurchmesser theoretisch

sogar nur noch 24 μm . Die hierzu verwendeten Material- und Randdaten sind in der Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19: Material- und Randdaten der Referenzpartikel

Materialdichte kg/m^3	Partikelradius μm	Partikelmasse kg	Geschwindigkeit m/s	Elektronen- ladungen -	Kinetische Energie Nm	Kinetische Energie eV
7980	0,5	4,18 E-15	1,36	100	3,87 E-15	24200

Die zu Beginn der Simulationsarbeiten für den Transport der gewählten Partikelgröße von einem Mikrometer minimal einzuhaltenden Trägergasgeschwindigkeiten konnten sogar noch erhöht werden, trotz einer für die Berechnungen sehr niedrig gewählten Anzahl von nur einhundert Elektronenladungen.

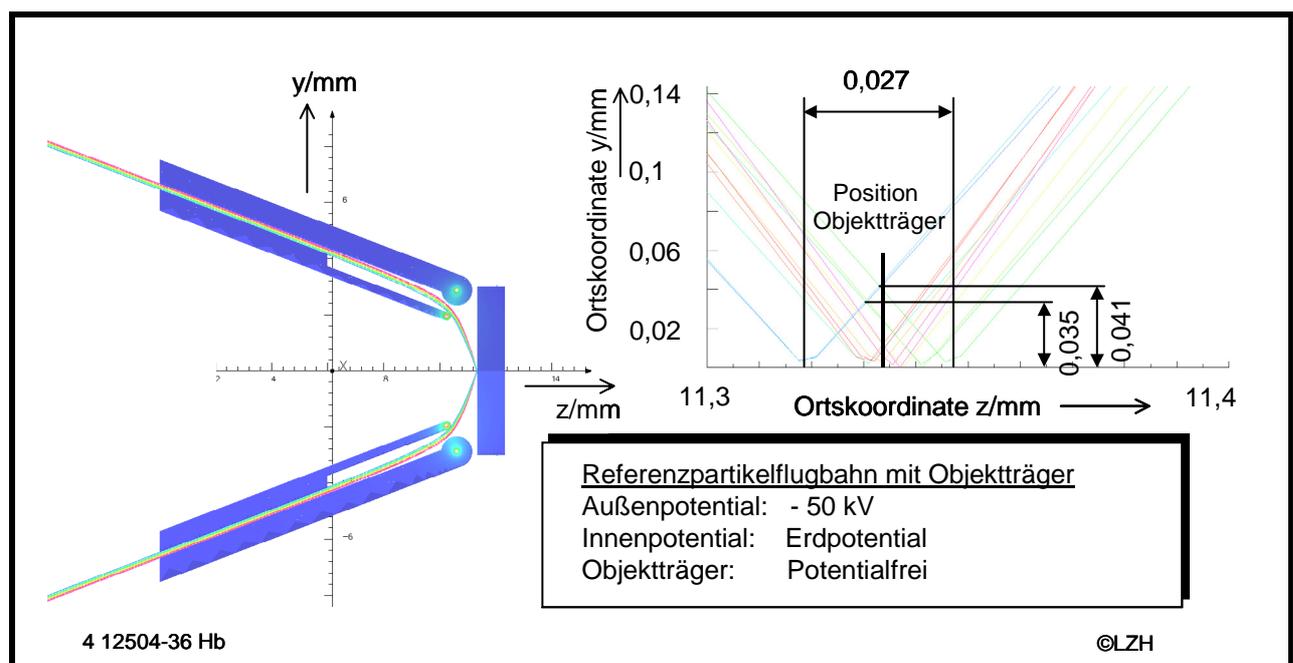


Abbildung 57: Partikelflugbahnen mit integriertem Objektträger

Auch die Einbindung einer Art metallischen Objektträgers zur Aufnahme der zu erzeugenden Mikrogeometrien auf die Partikelflugbahn führt zu keiner wesentlichen sich auf die Flugbahn negativ auswirkenden Feldänderung.

Zur Abschätzung der Einflussgrößen auf das Simulationsergebnis wird im Folgenden der Einfluss der Partikelgeschwindigkeit bei Beschränkung auf das Referenzpartikel untersucht. Aufgrund der im Abschnitt 8.2.2 „Elektrostatische Partikelfokussierung“ dargestellten Abweichungen innerhalb der Partikelaufladungsraten werden weiterhin die

Auswirkungen derselben auf die Flugbahnen der Referenzpartikel beleuchtet. Neben Berechnungen, die sich ausschließlich auf Daten des Referenzpartikels beziehen, werden auch die Auswirkungen bei Verwendung eines Partikelkollektivs bestehend aus unterschiedlichen Partikeldurchmessern betrachtet. Zu diesem Zweck erfolgen die Berechnungen unter Eingabe der jeweiligen Randbedingungen. Zur Auswertung der Partikelverläufe finden u. a. kombinierte Modell-Flugbahndarstellungen zur Überprüfung möglicher mechanischer Modellkollisionen Verwendung. Anhand dieser Ergebnisse kann eine Einschätzung möglicher Partikelkollisionen mit dem Modell erfolgen. Weiterhin erfolgt die Berechnung der bereits erläuterten y -, z -Diagramme, aus welchen die Ausdehnung der z -Achse (100 % und 80 %), die Abmessungen des Fokusbereichs (100 % und 80 %), die Fokusbahnlage (100 % und 80 %) und die Fokusbahnänderung entnommen werden können. Die Abmessungen des Fokusbereichs werden auch innerhalb dieser Auswertung durch Projektion der Partikelstrahlenverläufe auf der senkrecht auf der Rotationsachse stehenden y -Achse ermittelt. Die Prozentangaben beziehen sich auch hier auf die Anzahl der betrachteten Partikelstrahlen, die Fokusbahnänderung auf den Verlauf des Referenzstrahls.

8.2.3.3.1 Einfluss der Partikelgeschwindigkeit

Zur Abschätzung der Partikel Flugbahnänderungen durch Variation der Partikelgeschwindigkeit ist die kinetische Energie ausgehend von der Referenzpartikel Flugbahn mit einer kinetischen Energie von 24200 eV im Bereich von 17200 bis 31200 eV variiert worden. Dies entspricht einer Geschwindigkeit im Bereich von 1,148 bis 1,546 m/s, wobei die Partikelgeschwindigkeit auf der Referenzflugbahn bei 1,361 m/s liegt. Die Auswertung der Berechnungen zeigt innerhalb der Modell-Flugbahndarstellungen bereits bei kleinen Veränderungen der Partikelgeschwindigkeit signifikante Unterschiede innerhalb der Flugbahnverläufe. Lediglich im Bereich von 22200 bis 27200 eV liegen die Partikel Flugbahnen bei der o. g. Transmissionsrate von 80 %. Im Bereich unter 22200 eV führen die geringen Geschwindigkeiten bei konstanter Partikelladung zu einer stärkeren Verkrümmung der Flugbahnen, wodurch Kollisionen im Bereich des Innenpotentials hervorgerufen werden. Im Bereich über 27200 eV verstärkt sich der Einfluss der aerodynamischen Felder derart, dass die Feldkraft bei konstanter Partikelladung nicht mehr in der Lage ist, die Partikel entsprechend abzulenken. Es kommt zur Kollision mit der Außenelektrode.

In Abbildung 58 sind für den Bereich mit einer Transmissionsrate von mindestens 80 % die Auswirkungen der Partikelgeschwindigkeit auf den Fokusbereich und auf die Lageänderung der z -Achse dargestellt.

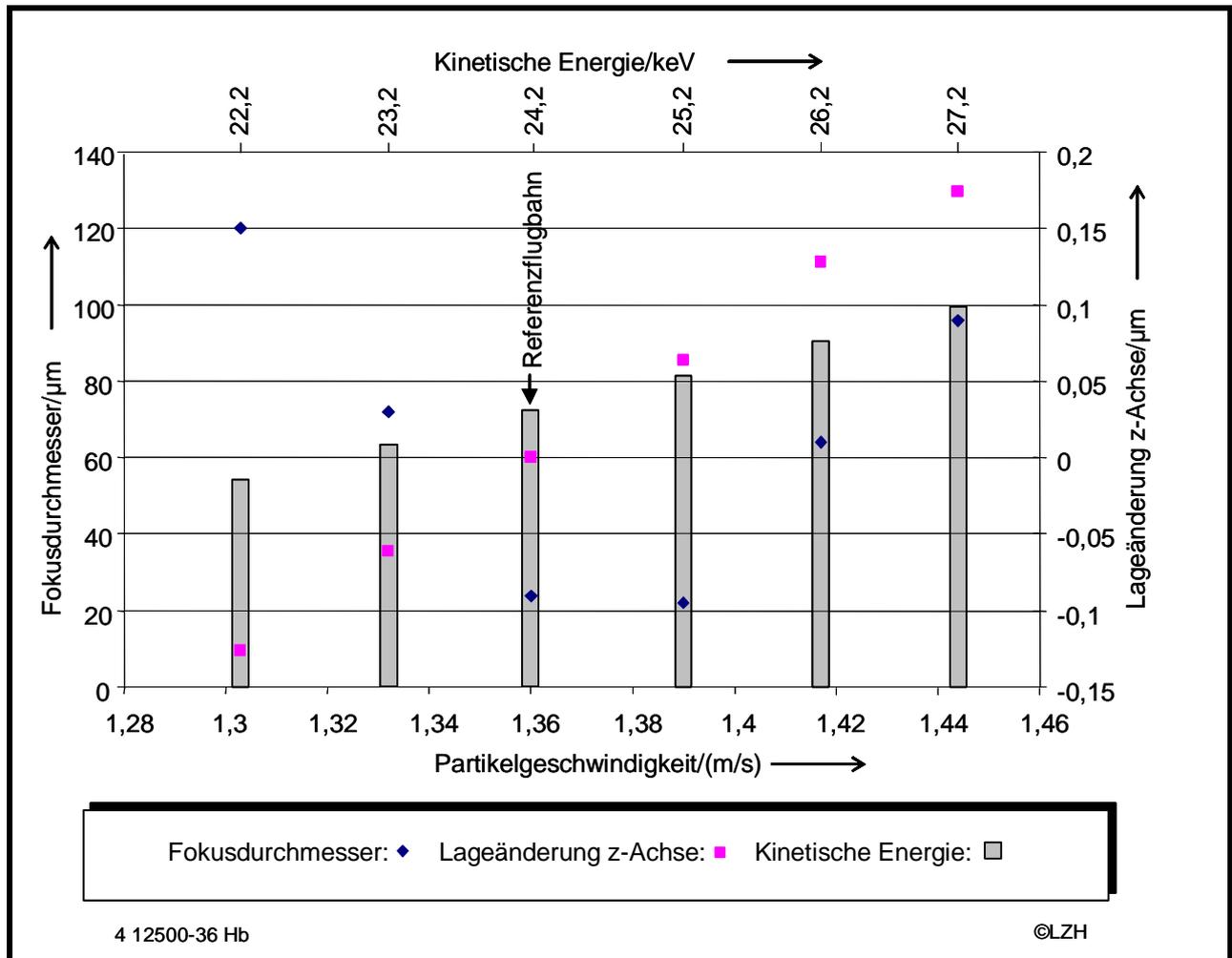


Abbildung 58: Einfluss der Partikelgeschwindigkeit (Referenzpartikel)

Aus der Darstellung wird deutlich, dass sich die Fokussoptimierung auf nur wenige Mikrometer nur in einem wenige hundertstel Meter pro Sekunde umfassenden Geschwindigkeitsbereich aufrecht erhalten lässt. Beim Verlassen dieses Bereiches nehmen die Abmaße des Fokussdurchmessers signifikant zu. Die Lageänderung des Partikelfokus verhält sich linear zur Partikelgeschwindigkeitszu- bzw. -abnahme.

8.2.3.3.2 Einfluss der Elektronenladungen

Aus den Ausführungen im Abschnitt 8.2.2.2 ist ersichtlich, dass die Höhe der experimentell bestimmten Partikelladungen im Fall der herangezogenen Quellen sehr stark differiert.

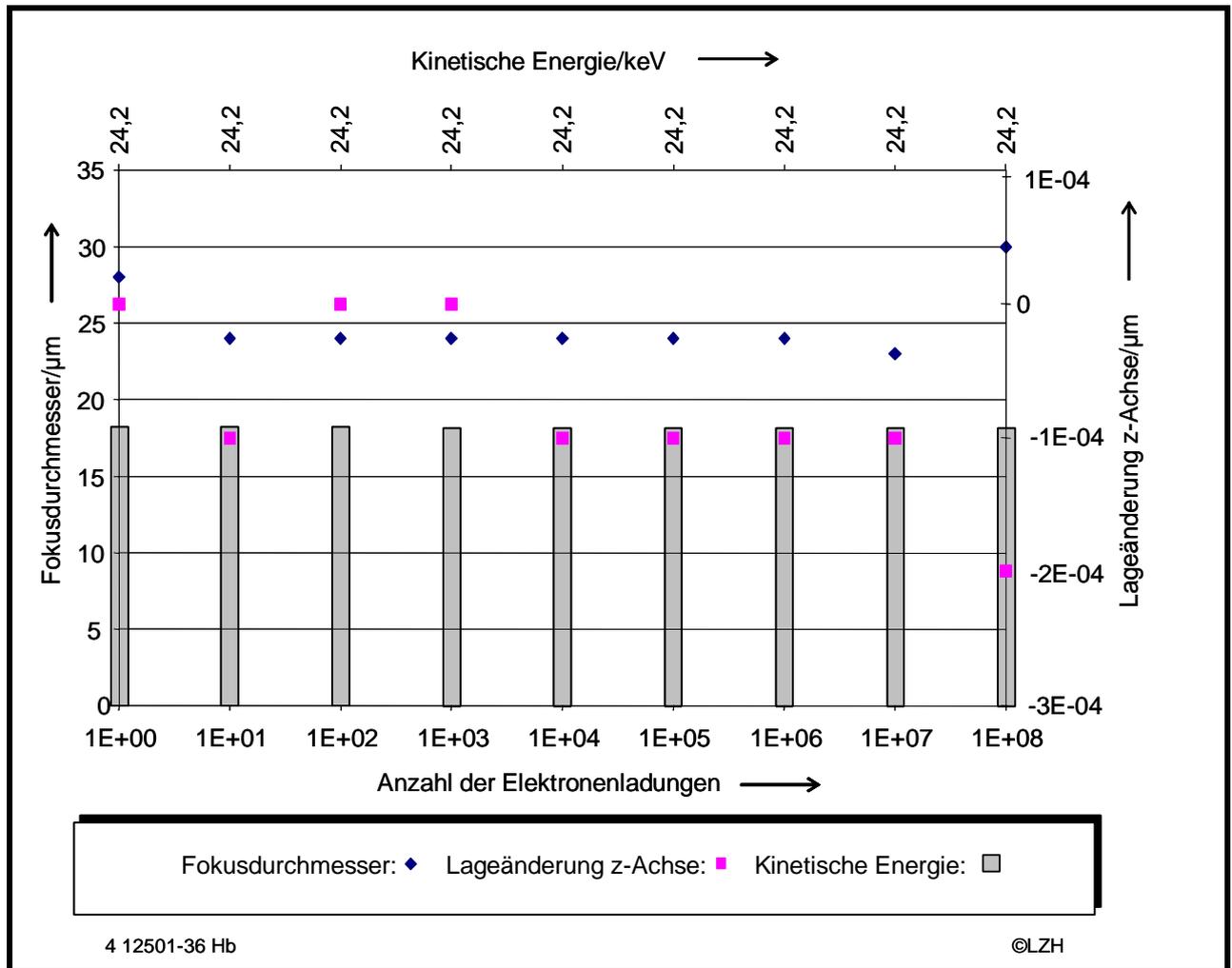


Abbildung 59: Einfluss der Elektronenladungen auf die Referenzflugbahn

Aus diesem Grund sind zur Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Partikel-
ladungen auf die Flugbahnen Reihenuntersuchungen durchgeführt worden. In diesen
Untersuchungen sind innerhalb der Referenzflugbahn die Anzahl der Elektronen-
ladungen ungeachtet der theoretisch maximal möglichen im Bereich von 0 bis $1E+8$ gesteigert wor-
den. In der Abbildung 59 ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Elektronen-
ladungen und dem Fokusbereich sowie der Lageänderung der z-Achse bei konstanter
kinetischer Energie dargestellt. In Anlehnung an Abbildung 58 bezieht sich die Darstellung
auf die 80 %-Auswertung, obwohl nach Auswertung der Modell-Flugbahndarstellung die
Transmissionsrate im betrachteten Bereich 100 % beträgt. Anhand der Darstellung wird
deutlich, dass die Variation der Anzahl der Elektronenladungen im Vergleich zur Variation
der Partikelgeschwindigkeit in einem Bereich von sieben Zehnerpotenzen zu keinen nen-
nenswerten Veränderungen sowohl beim Fokusbereich als auch innerhalb der La-
geveränderung führt.

8.2.3.3 Einfluss des Partikeldurchmessers

Da der Partikeldurchmesser über die Partikelmasse in der dritten Potenz in die kinetische Energie eingeht, soll dieser gesondert betrachtet werden. Zu diesem Zweck sind die Partikeldurchmesser im Bereich von 0,1 bis 2 μm bei konstanter Anzahl der Elektronenladungen und Partikelgeschwindigkeit variiert worden und die Berechnungsergebnisse in Abbildung 60 für den Bereich 0,1 bis 1,3 μm zusammengefasst dargestellt. Vergleichbar mit den Ergebnissen im Rahmen der Variation der Partikelgeschwindigkeit können vier ausgeprägte Bereiche der Partikelflugbahnen innerhalb der Modell-Flugbahndarstellung unterschieden werden.

Im Bereich A, der sich über die Partikelgrößenfraktion 0,1 bis 0,7 μm bewegt, ist der Einfluss des elektrischen Feldes aufgrund der geringen kinetischen Energie der Partikel so groß, dass die Partikel die mechanischen Grenzen des Modells bereits vor Durchlaufen des Bereiches zwischen den Potentialen durchtreten (vgl. Abbildung 60 unten). In diesem Bereich variieren die Abmessungen der Partikelstrahlbündel beim Durchtritt durch die Rotationsachse des Modells sehr stark; demzufolge kommt es zu zum Teil signifikanten Vergrößerungen der Fokusabmessungen. Der innerhalb der Variation der Partikelgeschwindigkeit auftretende lineare Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie und der Lageänderung der z-Achse kann für derart große Bereiche nicht bestätigt werden. Trotz der negativen Auswirkungen von Partikeldurchmessern des Bereiches A zeichnet sich dieser dadurch aus, dass eine mechanische Anpassung des Fokussierungsmoduls zur Fokussierung der Partikel in diesem Bereich möglich ist.

Anders verhält es sich in Bereichen B und D. Hier liegen die kinetischen Energien in einem Grenzbereich, der in Abhängigkeit der Partikelgröße zur Kollision mit dem Innen- oder Außenpotential führt und hierdurch eine vollständige Neukonzeptionierung des Fokussierungsmoduls hervorrufen würde. Lediglich der Bereich C, der sich über einen sehr geringen Partikelgrößenbereich von nur wenigen Mikrometern erstreckt, beinhaltet den geforderten Transmissionsgrad von mindestens 80 % der Partikelstrahlen.

Der Ansatz, die Kollision der unterschiedlichen Partikeldurchmesser durch Anpassung der Partikelgeschwindigkeiten zu verhindern, führen zu den Ergebnissen in Abbildung 61. Dargestellt sind erneut die Zusammenhänge zwischen der Partikelgeschwindigkeit und dem Partikeldurchmesser unter Hinzuziehung der jeweils aus den unterschiedlichen Massen und unterschiedlichen Geschwindigkeiten berechneten kinetischen Energie und der Lageänderung des Fokusdurchmessers auf der Rotationsachse des Fokussierungsmoduls.

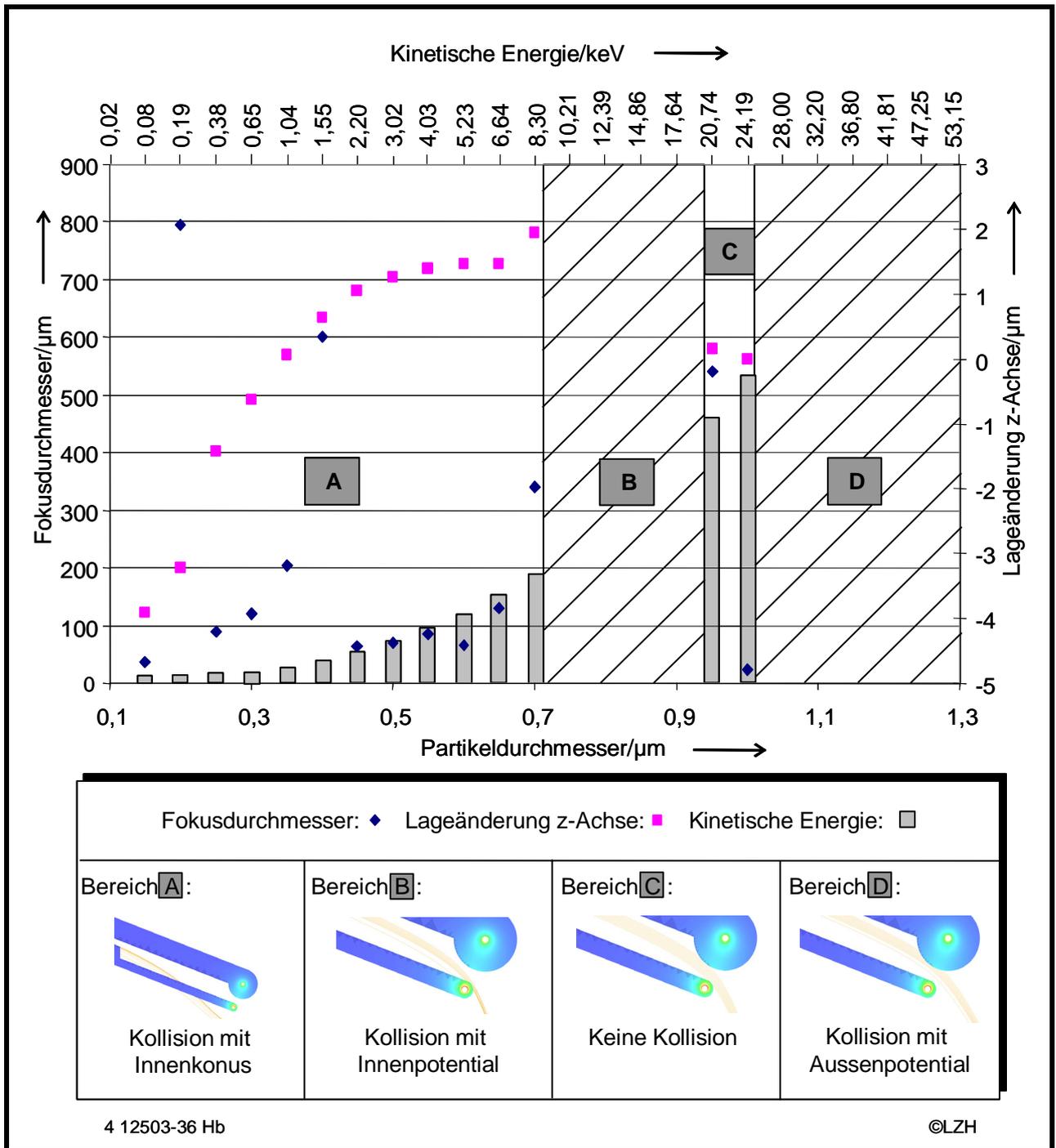


Abbildung 60: Einfluss des Partikeldurchmessers

Die Berechnungen zeigen, dass für den betrachteten Partikelgrößenbereich der Einfluss der kinetischen Energie ausschlaggebend ist. Ausschließlich im Bereich des für das Referenzpartikel ausgelegten Fokussierungsmoduls erfahren die Partikel die notwendige Ablenkung, die zu einem Transmissionsgrad von 100 % und einem Fokussdurchmesser im genannten Größenbereich führt.

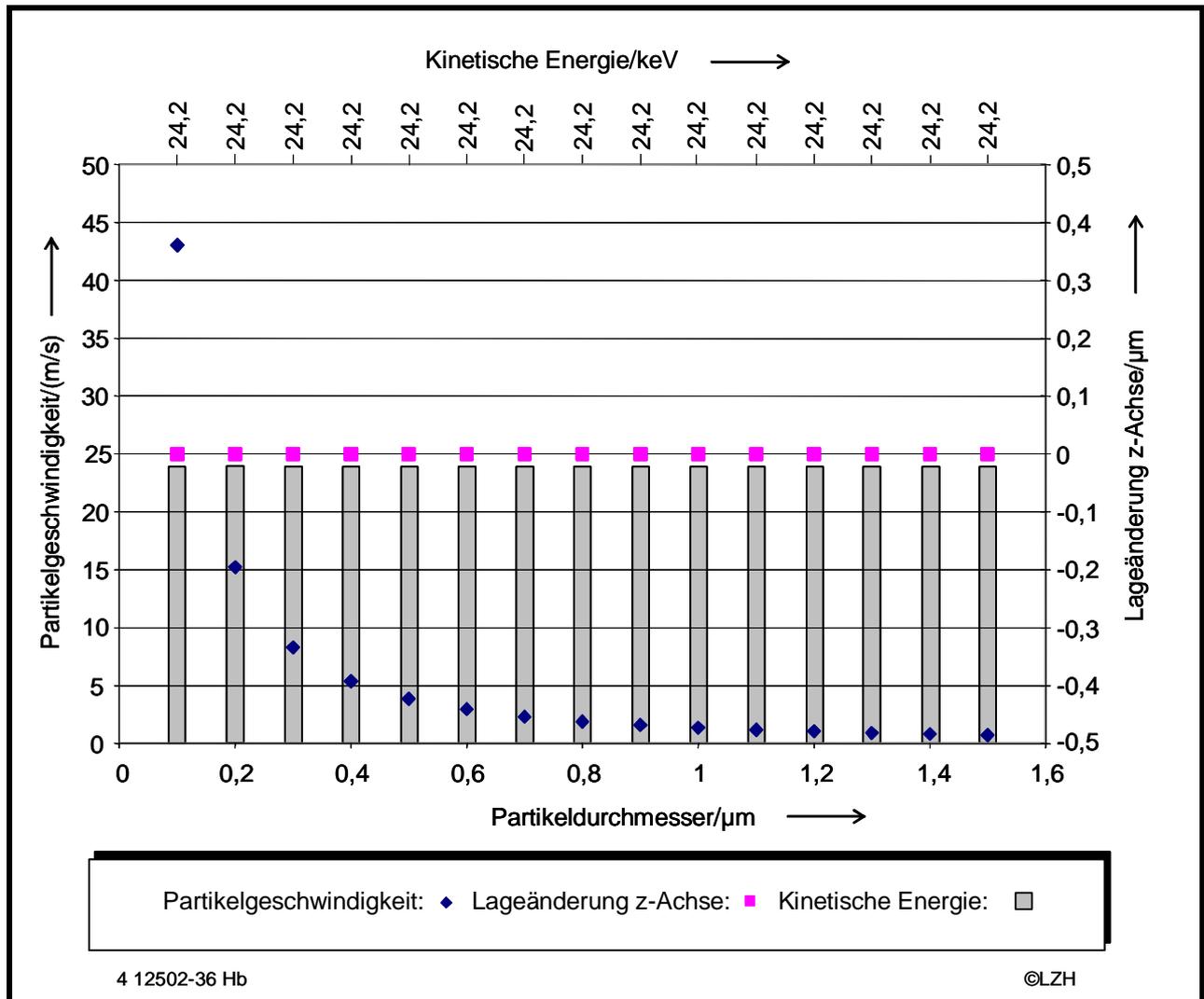


Abbildung 61: Geschwindigkeitsanpassung zur Kollisionsvermeidung

Die Ausführungen zu den Simulationsergebnissen zeigen, dass unter Einhaltung der bei der Auslegung getroffenen Annahmen hinsichtlich des Referenzpartikels die im Abschnitt 8.1 erläuterten Defizite unter Ausnutzung der elektrostatischen Partikelfokussierung kompensiert werden können. Weiterhin wird deutlich, dass der Partikelfokus auf den Bereich der Strahl-Material-Wechselwirkungszone angepasst und auf nur wenige Zehntel Mikrometer eingestellt werden kann, so dass die die negativen Effekte hervorrufenden Pulverrückstände aus nicht am Prozess beteiligten Partikelkollektiven weitestgehend ausgeschlossen werden können. Ein weiterer positiver Effekt innerhalb der elektrostatischen Partikelfokussierung wird bei Betrachtung der Abbildung 57 deutlich. Im Gegensatz zur aerodynamischen Partikelfokussierung verlaufen die Partikelstrahlen nicht in Längsachse des Düsenströmungskanal (vgl. Abbildung 39 und Abbildung 42), sondern erreichen das Schmelzbad infolge der Ablenkung durch die Potentialringe in einem im Vergleich mit der Düsensymmetrieachse flacheren Winkel, wodurch die Verweilzeit der

Partikel im Laserstrahl weiterhin verringert wird und hierdurch der beschriebenen verstärkten Strahlungsabsorption noch weiter entgegengewirkt wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die hier diskutierten Simulationsergebnisse erste Schritte auf dem Weg zur technischen Realisierbarkeit eines funktionstüchtigen Labormusters zur elektrostatischen Partikelfokussierung sind. Einige problemrelevante Einflussgrößen konnten jedoch aufgrund der verwendeten Simulationssoftware nicht oder nur bedingt berücksichtigt werden. So ist z. B. die Berücksichtigung mechanischer Grenzen bei den Berechnungen nicht vorgesehen, welches insbesondere durch die gezeigten Modell-Partikelflugbahnen deutlich wird. Eine andere nicht zu vernachlässigende Komponente ist das als Transportmedium dienende Trägergas, bzw. dessen Fluiddynamik. Alle hier berechneten Flugbahnen setzen ideale laminare Gasströmungen voraus. Diese dürfte aufgrund der im Abschnitt 8.2.1 erläuterten Partikelkollisionen nur begrenzt vorhanden sein.

9 Folgerungen und Ausblick

Zur Lösung der beschriebenen fluiddynamischen Probleme ist die Einbindung weiterer numerischer Näherungsverfahren notwendig, die von unterschiedlichen Ansätzen ausgehen. Der wohl verbreitetste Ansatz besteht in der Verrechnung einzelner Simulationsergebnisse sogenannter „table files“. In diesen table files werden für jedes Element des vermaschten Modells die problemrelevanten Parameter abgelegt, wodurch sich die Möglichkeit der Datenverrechnung mit bereits vorhandenen Daten ergibt. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es sich bei dem Ergebnis nicht um ein Gesamtergebnis sondern um die Summation von zwei Teilergebnissen handelt, so dass gegenseitige Wechselwirkungen unberücksichtigt bleiben. Beispielsweise würde für die vorliegende Problematik die gegenseitige Beeinflussung von Gasströmen und elektrischem Feld, wie sie gerade durch die geladenen Partikel entstehen können, nicht berücksichtigt werden.

Eine andere Möglichkeit bieten sog. Universalsimulatoren, innerhalb derer der Preprozessor durch eine rein mathematische Problembeschreibung ersetzt wird. Ein Beispiel hierfür ist die weit verbreitete Software MatLab, die von dem Programm FEMLAB als Eingabemedium benutzt wird. Da MatLab bereits Werkzeuge für numerische Rechenverfahren besitzt, greift FEMLAB zum Teil auf diese zurück. Da Handhabung und Verarbeitungsgeschwindigkeit dieser Kombination jedoch häufig als unbefriedigend bezeichnet wurden, wird FEMLAB zur Zeit in Richtung „stand-alone“ Lösung umgearbeitet. Heute bereits angeboten werden Programmmodule, die jeweils getrennt für elektromagnetische und fluiddynamische Probleme nutzbar sind, letztendlich jedoch durch die sich anschließende Verrechnung beider Ergebnisse wieder zu den bereits beschriebenen Nachteilen führen.

Das für die komplexe Anwendung sicherlich zur Zeit optimale Verfahren ist die Parallelsimulation. Dieses vom Fraunhofer-Institut für Algorithmen und wissenschaftliches Rechnen entwickelte Verfahren vereint die Vorteile der beiden vorher beschriebenen Verfahren, ohne deren Nachteile aufzuweisen. Wie der Name MpCCI (Mesh based parallel Code Coupling Interface) andeutet, handelt es sich um eine neuartige Methode, beliebige Simulatoren, die gleichzeitig rechnen, zur Erzeugung eines Gesamtergebnisses zu benutzen. Die einzelnen Simulatoren können hierbei unterschiedliche Vermaschungen benutzen. Mit einem Nachbarschaftsanalyse genannten Verfahren werden diese entsprechend gewichtet für die Berechnung des Gesamtergebnisses benutzt. Im Fall der Verwendung von Parallelcode durch die beteiligten Einzelsimulatoren können die Einzelelemente sogar aneinander angepasst werden. Der entscheidende Vorteil dieses

Verfahrens ist, dass das Gesamtergebnis nicht nachträglich nach Abschluss aller Berechnungen gebildet wird, sondern für jedes Einzelelement bei jeder Iteration ein Zwischenergebnis entsteht, das die Ergebnisse aller Simulatoren berücksichtigt und als Basis für die nächste Iteration dient. Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Parallelcode ist, dass Partikel keine mechanischen Grenzen überschreiten können, wenn diese in einem anderen beteiligten Modul als Sperrzone definiert sind.

Trotz der zur endgültigen Qualifizierung des Ansatzes der elektrostatischen Partikelfokussierung noch fehlenden weiterführenden Simulationsarbeiten und deren späterer fertigungstechnischer Umsetzung konnten bereits mit den vorgestellten Ergebnissen wesentliche Einflussgrößen erkannt und durch Modellanpassungen optimiert werden. Die Wahl von Modellgeometrien, die eine Integration in das Gesamtsystem (Laserstrahlkaustik, Pulverzufuhr etc.) bereits in diesem Stadium berücksichtigt, und die auf den Anwendungsfall zugeschnittene Werkstoffauswahl (z.B. bzgl. Isolationsmaterialien) machen das hohe Nutzungspotential dieser Technologie im Bereich des lasergestützten 3D-Mikro-Laserstrahlaufragschweißens bereits in diesem Stadium deutlich.

10 Zusammenfassung

Bestrebungen, Rapid Prototyping Verfahren auch innerhalb der Mikro- und Mikrosystemtechnik mit Strukturgrößen im Bereich von 1 bis 100 μm nutzen zu können, um damit letztlich auch die kostenintensive Umformtechnik durch die LIGA-Technik zu umgehen, führten zu verschiedenen Weiterentwicklungen innerhalb dieses Bereichs. Ziele dieser Weiterentwicklungen liegen insbesondere in einer Erhöhung der Strukturgenauigkeit bis in den unteren zweistelligen Mikrometerbereich und der Erschließung einer größeren Werkstoffpalette. Immer noch als ungelöst gilt hierbei z. B. die direkte einstufige Herstellung von metallischen Funktionsprototypen für den Mikrobereich mit hohen Festigkeitsanforderungen und hohen geometrischen Auflösungen.

Im Überblick werden zunächst ausgehend von den wichtigsten Rapid Prototyping Verfahren zur direkten Herstellung von Funktionsprototypen für den makroskopischen Bereich die Weiterentwicklungen unter dem Gesichtspunkt einer Nutzung für den mikroskopischen Bereich dargestellt und hinsichtlich der Erzeugung von metallischen Bauteilen beurteilt. Dabei wird deutlich, dass innerhalb der generativen Verfahren lediglich das 3D-Laserstrahlaufragschweißen zum Aufbau von kompakten rein metallischen Funktionsprototypen geeignet ist und durch entsprechende Anpassung der verwendeten Systemkomponenten alle Möglichkeiten zur Herstellung von miniaturisierten Funktionsbauteilen besitzt.

Einleitend werden das Verfahrensprinzip mit den wesentlichen Verfahrensparametern des 3D-Laserstrahlaufragschweißens erläutert und die Besonderheiten innerhalb der Strahl-Stoff-Wechselwirkung aufgeführt. Im Besonderen wird auf die im Vergleich zu Makropartikeln abweichenden Absorptionseigenschaften von Mikropartikeln eingegangen. Hierzu erfolgt anhand der geometrischen Verhältnisse der Partikelfokussierung eine Abschätzung des Transmissionsgrades der Laserstrahlung basierend auf der Theorie nach Mie, innerhalb derer die Transmissionsgrade unterschiedlicher relevanter Massenströme und Partikeldurchmesser abgeschätzt werden.

Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgt die Konstruktion, Fertigung und Inbetriebnahme von Anlagenkomponenten zur Integration in ein Gesamtmaschinenkonzept. Kernstück der Anlage ist ein Yb:YAG-Scheibenlaser, der aufgrund seiner Strahlqualität und einer entwickelten optischen Bank Fokusdurchmesser von unter 10 μm ermöglicht und durch Kombination mit einer vierachsigen Mikrohandhabungsstation die Herstellung von Mikrobauteilen ermöglicht. Zur Förderung der Mikropartikel ist ein Mechanismus entwickelt worden, der durch die Kombination einer mechanischen Fördereinheit mit Ultraschalltechnologie eine aerodynamische Förderung von Partikelfraktionen im Bereich von 5 μm

unter Einhaltung geringer Trägergasgeschwindigkeiten ermöglicht und mit einem Modul zur Fokussierung der Partikel erweitert wird.

Alle entwickelten Anlagenkomponenten werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften durch umfangreiche Qualifizierungsuntersuchungen u. a. mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen verifiziert. Aus Gründen der Qualitätssicherung werden zahlreiche Peripheriekomponenten wie z. B. eine pyrometrische Temperaturregelung mit in das Anlagenkonzept integriert.

Zur Steuerung und Regelung der Anlage wird eine vollautomatisierte Handhabungshard- und -software entwickelt, innerhalb derer auf umfangreiche Ausbaumöglichkeiten hinsichtlich einer Integration unterschiedlichster Applikationen in der Mess- und Steuerungssoftware sowie Anwendungen im Bereich der Prozessüberwachung Wert gelegt wird.

In einem sich anschließenden experimentellen Teil sind erste Einlagenschweißuntersuchungen dokumentiert, die die Möglichkeiten der Anlage hinsichtlich der Erzeugung von Geometrien und deren minimal erreichbarer Auflösungen aufzeigen. Die Ergebnisse belegen das hohe Potential der Anlage, welches sich durch geschweißte, kompakte Einzelbahnen mit Strukturbreiten kleiner $15\ \mu\text{m}$ im Anfangsbereich der Schweißnaht auszeichnet. Allerdings ist für den weiteren Verlauf der Schweißnaht eine Auflösung der Struktur zu beachten, was auf einen zu geringen Transmissionsgrad der Strahlung zurückgeführt wird.

Aufgrund der detektierten Defizite bei Verwendung der aerodynamischen Partikelfokussierung erfolgen Qualifizierungsuntersuchungen innerhalb derselben, die durch theoretische Diskussion getroffenen Aussagen untermauert und anhand einer numerischen Strömungsanalyse verifiziert werden.

Alternativ zur verwendeten aerodynamischen Partikelfokussierung wird eine elektrostatische Partikelfokussierung eines geladenen Partikelstromes untersucht. Wesentliche Aspekte wie Aufladungsart und Aufladungshöhe werden diskutiert. Basierend auf dem verwendeten geometrischen Modell erfolgen umfangreiche Simulationsarbeiten hinsichtlich unterschiedlich modifizierter Modelle, in deren Rahmen die Fokussiereigenschaften untersucht werden. Unter Verwendung realer Materialdaten wird ein Modell entwickelt, auf dessen Basis Fokusdurchmesser im Bereich von $40\ \mu\text{m}$ erreicht werden können.

Hierdurch ist es möglich, den Partikelwirkungsgrad zu erhöhen und damit die Strahlungsabsorption im Partikelstrahl zu vermindern. Zusätzlich erfolgt die Auslegung der Modellgeometrie in der Art, dass die Strahl-Partikel-Wechselwirkungszeit durch die

Veränderung des Flugwinkels stark vermindert werden kann, welches ebenfalls den o.g. Effekten entgegenwirkt.

Anhand der entwickelten Modellgeometrie erfolgt eine Qualifizierung der Einflüsse von variierenden Partikelgeschwindigkeiten, Elektronenladungen und Partikeldurchmessern.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Wohlers, T.: Weltweite Branchenübersicht 2002 Rapid Prototyping & Tooling. AlphaCAM Fertigungssoftware GmbH, Wiesenstr. 33, 73614 Schondorf, 2002
- [2] Haferkamp, H.; Matteazzi, P.; Becker, H. et al.: Competence in Nanotechnology at the Laser Zentrum Hannover e.V. – Direct Microscale Fabrication of 3D Components Based on Nanophased Powders. In: Konferezenzelbericht, Euronanoforum 2003, Trieste, I.
- [3] IKB Deutsche Industriebank AG; IKB Report – Mikrosystemtechnik - eine Schlüsseltechnologie; 10.04.2000
- [4] Hesselbach, J.: mikroPRO – Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. In: Vulkan-Verlag 2002. (ISBN 3-8027-8669-6)
- [5] Systemanbieter weltweit auf einer Übersicht. RPD-Report NCG Jg. 5, Nr. 8 1998, NCG e.V., Ulm 1998
- [6] Rauh, W.: Virtuelle Produkte und Rapid Prototyping. In: Konferenz-Einzelbericht: Fraunhofer IPA-Technologie-Forum: Produkte mit technischer Intelligenz entwickeln, herstellen und betreiben, Juli 1999, Stuttgart. Band F42, S. 17-22
- [7] Eschl, J.; Baumann, F.; Möggiger, B. et al.: Methodik zur Erstellung des ersten Prototyps. In: Plastverarbeiter. (1999) Band 50, Heft 8, S. 76, 78 und 80
- [8] Schumacher, B.: Neue Prozesskettengestaltung mit Rapid Prototyping. In: Konferenz-Einzelbericht: VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB): Produktion hat Zukunft – Düsseldorfer Produktionstage 1998, 25.-26.03.1998, Düsseldorf. Düsseldorf: VDI-Verlag. – (ISBN 3-18-091388-6), Band 1388, 1998, S. 233-241
- [9] Langen, M.: Potentiale des Rapid Tooling für das Spritzgießen. In: Konferenz-Einzelbericht: 8. Würzburger Werkzeugtage: Der Spritzgießformenbau im internationalen Wettbewerb, 24.-25.09.1997, Würzburg, S. K.1-18
- [10] Wünsche, R.: Rapid Prototyping – Wozu soll das gut sein. In: Gießerei-Praxis. (2000) Heft 10, S. 10-13

- [11] N.N.: Schneller auf dem Markt. Rapid Prototyping beschleunigt die Entwicklung. In: CADplus. Heft 4, 2000, S. 48-50
- [12] Leuthe, W.: Rapid Prototyping (RP) und Rapid Tooling (RT). In: Konferenz-Einzelbericht: 17. Jahrestagung Elastomerverarbeitung: Vom Konzept zur Serie, 9.-10.02.1999, Braunschweig. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999 (ISBN 3-18-234214-2), S. 113-127
- [13] Köhler, P.; Blümer, M.: Auswahlkriterien für Verfahren zum Herstellen von Prototypen. In: Maschinenmarkt Würzburg, Band 105, Heft 37, 1999, S. 30-34, 37
- [14] Nagamori, S.: Research on shape of solidified resin in stereo-lithography. In: Konferenz-Einzelbericht: Optical Technology and Image Processing for Fluids and Solids, Diagnostics 2002, China, 2002, S. 447-456
- [15] Homepage von 3D-Systems: www.3dsystems.com
- [16] Homepage von Aaroflex, Inc.: www.aaroflex.com
- [17] Chartier, T.; Chaput, C.; Doreau, F.: Rapid Prototyping of complex ceramic parts. In: Konferenz-Einzelbericht: 7th Conference of the European Ceramic Society, 9.-13. Sep. 2001, Brugge, Belgien. Uetikon-Zürich: Trans Tech Publ (ISBN 0-87849-882-6), Band 206-213, 2001, S. 293-296
- [18] Chaput, C.; Chartier, T.; Doreau, F.: Stereolithography for ceramic part manufacturing. In: Konferenz-Einzelbericht: 7th Internat. Symp. Ceramic Materials and Components for Engines, Applications in Energy, Transportation and Environment Syst, 19.-21. Juni 2000, Goslar. Weinheim: Wiley-VCH (ISBN 3-527-30416-9), 2001, S. 353-357
- [19] Wilkening, C.: Fast Production of Technical Prototypes Using Direct Laser Sintering of Metals and Foundry Sand. In: Proceedings of the Solid Freeform Symposium, Austin, USA, 1996, S. 133-140
- [20] Wang, H.; Bourell, D.; Beaman, J.P.: Selective Laser Sintering of Quartz Powder. In: Konferenz-Einzelbericht: Proceedings of the Solid Freeform Symposium, 11.-18. Aug. 1997, Austin, USA. Austin, Tex.: Univ. of Texas, 1997, S. 465-472

- [21] Klocke, F.; Wirtz, H.: Selective Laser Sintering of Ceramics. In: Konferenz-Einzelbericht: Proceedings of the LANE '97, 23.-26. Sept. 1997, Erlangen. Bamberg: Meisenbach (ISBN 3-87525-090-7), 1997, S. 589-596
- [22] Shellabear, M.; Junior, V.: Application of laser-sintering and casting process chains to the rapid development and manufacture of powertrain components. In: Konferenz-Einzelbericht: Proc. of the 1999 Global Powertrain Congress (GPC '99): New Materials & Development Processes, 5.-7. Oct. 1999, Stuttgart. Vol. 11, S. 1-6
- [23] Nowotny, S.; Löschau, W.; Tangermann, K.: Direct metal and ceramic prototyping by laser built-up welding and selective laser sintering. In: Konferenz-Einzelbericht: Proc. of the 1999 Global Powertrain Congress (GPC '99): New Materials & Development Processes, 5.-7. Oct. 1999, Stuttgart. Vol. 11, S. 11-19
- [24] Kotila, J.; Lind, J. E.; Nyrhilä, O.: Steel based metal powder blend for direct metal laser sintering process. In: Konferenz-Einzelbericht: Metal Powder Industries Federation: International Conference and Exhibition on Powder Metallurgy & Particulate Materials, 20.-24. June 1999. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1999 (ISBN 1-87895-474-1), Vol. 2, S. 5.87 – 5.93
- [25] Kuzman, K.; Geiger, M.; Coremans, A.: Rapid sheet metal development chain supported by laser sintered active tool parts. In: Konferenz-Einzelbericht: Advanced Technology of Plasticity: Proc. of the 6th Internat. Conf. on Technol. of Plasticity, 19.-24. Sept. 1999, Nürnberg. Berlin: Springer, 1999 (ISBN 3-540-66066-6), Vol. II, S. 999-1004
- [26] O'Neill, W.; Sutcliffe, C. J.; Morgan, R.: Investigation on multi-layer direct metal laser sintering of 316 L stainless steel powder beds. In: 49th General Assembly of CIRP, 22.-28. Aug. 1999, Montreux, CH.: Hallwag (ISBN 3-905277-31-X), Vol. 48, No. 1, 1999, S. 151-154
- [27] Das, S.; Wohlert, M.; Beaman, J. J.: Producing metal parts with selective laser sintering/hot isostatic pressing. In: JOM – The Journal of Minerals, Metals und Materials Society, Vol. 50, No. 12, 1998, S. 17-20

- [28] Löschau, W.; Tangermann, K.; Pöschke, M.: Direktes Laser-Sintern zum Rapid Prototyping von formkomplizierten Bauteilen aus Stahl. In: Metall – Internationale Fachzeitschrift für Metallurgie. (1999) Band 53, Heft 11, S. 610-615
- [29] Shellabear, M.: Rapid Tooling with Direct Metal Laser-Sintering. In: Rapid Tooling 2002, Conf. Proc. 2002, S. 89-90
- [30] Homepage der Firma DTM: www.dtm-corp.com
- [31] Homepage der Firma EOS: www.eos-gmbh.de
- [32] Homepage der Firma ProMetal: www.prometal-rt.com
- [33] Achs, E.; Wylonis, E.; Allen, S.: Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process. In: Polymer Engineering and Science. (2000) Vol. 40, No. 5, S. 1232-1247
- [34] Wegner, L. D.; Gibson, L. J.: Mechanical behaviour of interpenetrating phase composites – II: A case study of a three-dimensionally printed material. In: International Journal of Mechanical Sciences. (2000) Band 42, Heft 5, S. 943-964
- [35] Park, J.; Tari, M. J.; Hahn, H. T.: Characterization of the laminated object manufacturing process. In: Rapid Prototyping Journal. (2000) Vol. 6, No. 1, S. 36-49
- [36] Gebhardt, A: Rapid Prototyping: Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2000 (ISBN 3-446-21242-6)
- [37] Klostermann, D.; Chartoff, R. P.; Osborne, N. R.: Direct Fabrication of Ceramics, CMC's by Rapid Prototyping. In: Zeitschriftenaufsatz: American Ceramic Society bulletin. (1998) Vol. 77, No. 10, S. 69-74
- [38] Klosterman, D. A.; Chartoff, R. P.; Osborne, N. R.: Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites. In: Rapid Prototyping Journal. (1999) Vol. 5, No. 2, S. 61-71

- [39] Kievit, O.; Weiss, M.; Verheijet P. J. T. et al.: The On-Line Chemical Analysis of Single Particles Using Aerosol Beams and Time of Flight Mass Spectrometer. In: Chem. Eng. Comm. (1996) 151, S. 79-100
- [40] Liu, P.; Ziemann, P. L.; Kittelson, D. B. et al.: Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions. In: Aerosol Sci. Technol. (1995) Vol. 22, S. 293-313
- [41] Schreiner, J.; Voigt, C.; Mauersberger, K. et al.: Aerodynamic Lens System for Producing Particle Beams at Stratospheric Pressures. In Aerosol Sci. Technol. (1998) 29, S. 50-56
- [42] Jafari, M. A.; Han, W.; Mohammadi, F. et al.: A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics. In: Rapid Prototyping Journal. (2000) Vol. 6, No. 3, S. 161-174
- [43] Mohammadi, F.; Kholkin, A. L.; Danforth, S. C.: Processing and Electromechanical Properties of Dome-Shaped Actuators fabricated by Fused Deposition of Ceramics. In: Konferenz-Einzelbericht: IEEE International Symposium on Application of Ferroelectrics, 1998. S. 273-276
- [44] Homepage der Firma Castle Island Corp www.att.net. The worldwide guide of Rapid Prototyping
- [45] Homepage der Firma POM Inc.: www.pom.net
- [46] Homepage der Firma Optomec Inc.: www.optomec.com
- [47] IKB Deutsche Industriebank AG, IKB Report – Der Markt; 10.04.2000
- [48] Stuible, L.: Microsystems World Market Analysis 2000 – 2005. In: WTC – Wicht Technologie Consulting, 2002
- [49] Seifert, S.; Joswig, J.: Anwendungsmöglichkeiten des MPL-Verfahrens bei der Entwicklung mikrofluidischer Komponenten. In: Konferenz-Einzelband: Micro-Engineering Kongreß 1998, Tagungsband, Kongreß für Mikrosysteme und

- Präzisionstechnik, Symp. Fertigung miniaturisierter Teile, 15.-16. Sept. 1998, Stuttgart; Messe Stuttgart, 1998, S. 57-60
- [50] Klotzbücher, T.; Schulz, W.: Der Laser, ein flexibles Strahlwerkzeug für die Mikrotechnik. In: Konferenz-Einzelbericht: Technologie-Transfer, Mikrosystemtechnik, Ultrapräzisionsfertigung, 1. Anwender-Fachtagung/Ausstellung, 30.-31. März 2000, Dornbirn, A., S. 5.1-5.32
- [51] Cord, T.; Schillen V.: Einsatz von Rapid Prototyping-Verfahren in der Mikrosystemtechnik. In: Konferenz-Einzelband: MicroEngineering Kongreß 98, Tagungsband, Kongreß für Mikrosysteme und Präzisionstechnik, Symp. Fertigung miniaturisierter Teile, Stuttgart, 15.-16. Sept. 1998, S. 39-44
- [52] Pollack, S.: Rapid Prototyping auf Basis des MPL-Verfahrens. In: Konferenz-Einzelband: MicroEngineering Kongreß 98, Tagungsband, Kongreß für Mikrosysteme und Präzisionstechnik, Symp. Fertigung miniaturisierter Teile, Stuttgart, 15.-16. Sept. 1998, S. 51-53
- [53] Knörschild, M.: Entwicklung der Steuerung für eine MPL-Anlage. In: Report: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Forschungsberichte, Report-Nr.: 16SV334/6 (2000)
- [54] IKB Deutsche Industriebank AG; IKB Report, November 2000
- [55] Götzen, R.: 3D-Strukturen schnell umgesetzt. In: F + M, Feinwerktechnik, Mikroelektronik, (1998) Band 106, Heft 3, S. 134-136
- [56] Knitter, R.; Bauer, W.; Göhring, D. et al.: Comparison of Different RP Techniques Used in Rapid Prototyping Process Chains for Ceramic Components. In: Konferenz Einzelbericht: Euro-u Rapid 2002, International User's Conference on Rapid Prototyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing, High-Tech Solutions and Concepts, Frankfurt/Main Proc. 2002, S. 1-7
- [57] Riehl, C.: Verfahrens-Varianten in der Mikrosystemtechnik. Mikrosysteme in der Kunststofftechnik – Beispiele aus der Fülle von Verfahren und Technologie. In: Kunststoffberater, Band 47 (2002) Heft 3, S. 23-25

- [58] Bohlmann, H.; Liegerer, M.; Götzen, R. et al.: Micro RP&M Technologies for End User Applications. In: Euspen Precision Engineering Nanotechnology, 2nd Internat. Conf. European Society for Precision Engineering and Nanotechnol. Proc., Vol. 1, Turin, I., May 27-31, 2001 Vol. 1, S. 132-135
- [59] Homepage der Firma microTEC: www.microtec-d.com
- [60] Götzen, R.; Röhr, M.: Micro Rapid Product Development – generatives Fertigungsverfahren der Mikrostrukturtechnik. In: Konferenz-Einzelbericht: RPD, Internat. Conf. on Rapid Product Development. Proc., 10.-11. June 1996, Stuttgart, S. 155-164
- [61] Tönshoff, H. K.; von Alvensleben, F.; Körber, K.: Qualification of different standard photo resins and new laser sources for micro-stereolithography. In: Konferenz-Einzelbericht: Micro Materials, MicroMat 2000, 3rd Internat. Conf. and Poster Exhibition, Proc., 17.-19. April, 2000, Berlin, S. 763-766
- [62] Czerner, S.; Becker, H.; Beil, A.: Laserschnelle Prototypen. In: phi Produktionstechnik Hannover informiert. (2001) Heft 4, S. 16, 17
- [63] Knitter, R.; Göhring, D.; Haußelt, J. H.: Schnelle Fertigung mikrostrukturierter Keramikbauteile. In: Keramische Zeitschrift. (1999), Band 51, Heft 12, S. 1064-1069
- [64] Bohlmann, H.: Mündliche Aussagen Fa. MicroTEC, 2002
- [65] Chen, J; Wang, X.; Zuo, T.: The micro fabrication using selective laser sintering micron metal powder. In: Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, Vol. 5116 (2003), S. 647-651
- [66] Leclerc, H.; Boudeau, N.; Gelin, J. C.: Investigations on selective laser sintering process for manufacturing microparts. Konferenz-Einzelbericht: Laser Assisted Net Shape Engineering 3, Proc. of the 3rd LANE 2001, Bamberg: Meisenbach (2001), S. 407-410

- [67] Kathuria, Y. P.: Laser Assisted Metal Rapid Prototyping in Micro-Domain. In: Nakagawa, T. et al. (Ed.): Proceedings of the Eight International Conference on Rapid Prototyping. Dayton (2000), S. 160-165
- [68] Kathuria, Y. P.: Microstructuring of Metallic Powder / Hard Materials by Selective Laser Sintering Process. In: Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, Proceedings of the 6th ICTP (1999), S. 1011-1016
- [69] Kathuria, Y. P.: Laser Microstructuring of Composite Powder Materials. In: MHS'98, Proceedings of the 1998 International Symposium on Micromechatronics and Human Science. Nagoya (1998), S. 105-109
- [70] Li, X.: Laser-based meso/micro rapid manufacturing system. Konferenz-Einzelbericht: Solid Freeform Fabrication Proceedings, Proc. of the SFF Symp. (2002), S. 490-501
- [71] Matsusaka, S. et al.: Micro-feeding of fine powders using a capillary tube with ultrasonic vibration. In: Advanced Powder Technology, Vol. 6, No. 4 (1999), S. 283-293
- [72] Matsusaka, S. et al.: Micro-feeding of fine powders using a vibrating capillary tube. In: Advanced Powder Technology, Vol. 7, No. 2 (1996), S. 141 - 151
- [73] Ebert, R.: Generierung von Mikrostrukturen mit selektivem Vakuumlasersintern. In: Laser Magazin 4/2002, S.19
- [74] Ebert, R.; Exner, H.: Patentschrift DE 19952998 A1, 17.05.2001
- [75] Ebert, R. et al.: Patentschrift DE 19507206 C2, 28.05.1997
- [76] Haferkamp, H.; Becker, H.; Czerner, S.: „Yb:YAG laser and micro powder feeding for micro rapid prototyping.“ In: 14th International Symposium on Electromachining; Edinburgh, Scotland 30.03.04 –01.04.04
- [77] Stippler, P.: Mündliche Aussagen Laser Zentrum Hannover e.V., 2002
- [78] Yamaguchi, K; Katsuhiko, S.; Yamanaka, T.: Generation of three-dimensional micro structure using metal jet. In: Precision Engineering. (2000) Heft 24, S. 2-8

- [79] Lewis, G. K.; Nemec, R.; Milewski, J.; Thoma, D. J. et al.: Directed Light Fabrication. In: Konferenz-Einzelbericht: Laser Materials Processing Conference, Proceedings of ICALEO, 17.-20. Oct. 1994, Orlando. Orlando, Florida: Laser Institute of America, 1994. – ISBN 0-912035-52-8, S. 17-26
- [80] Kreutz, E. W.; Brackes, G.; Gasser, A.; Wissenbach, K.: Rapid Prototyping with CO₂ Laser Radiation. In: Applied Surface Science. (1995) Vol. 86, S. 310-316
- [81] Thoma, D. J.; Lewis, G. K.; Memec, R. B.: Solidification Behavior during Directed Light Fabrication. In: Konferenz-Einzelbericht: International Conference on Beam, Processing of Proceedings of Advanced Materials, 30.10.-02.11.1995, Cleveland. Ohio: ASM International, 1995. – ISBN 0-87170-563-X, S. 247-253
- [82] Milewski, J. O.; Thoma, D. J.; Fonseca, J. C.; Lewis, G. K.: Development of a Near Net Shape Processing Method for Rhenium Using Directed Light Fabrication. In: Journal of Materials and Manufacturing Processes. (1998) Vol. 13, No. 5, S. 719-730
- [83] Morgan, S. A.; Fox, M. D. T.; McLean, M. A.; Hand, D. P. et al.: Real-time process control in CO₂ laser welding and direct casting: focus and temperature. In: Konferenz-Einzelbericht: Proceedings of ICALEO, Sec. F, 1997, S. 290-299
- [84] Jeng, J. Y.; Peng, S. C.; Chou, C. J.: Metal Rapid Prototype Fabrication using Selective Laser Cladding Technology. In: International Journal of Advance Manufacturing Technology. (2000) Vol. 16, S. 681-687
- [85] Keicher, D. M.; Miller, W. D.; Smugeresky, J. E.; Romero, J. A.: Laser Engineering Net Shaping (LENS): Beyond Rapid Prototyping to Direct Fabrication. In: Konferenz-Einzelbericht: Proceedings of the 1998 TMS Annual Meeting, 16.-19. Feb. 1998, San Antonio, Texas. Warrendale, PA: Minerals, Metals & Materials Society, 1998. – ISBN 0-87339-394-5, S. 369-377
- [86] Kulkarni, P.; Dutta, D.: On the Integration of Layered Manufacturing and Material Removal Processes. In: ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. (2000) Vol. 122, No. 1, S. 100-108

- [87] Wissenbach, K.: Umwandlungshärten mit CO₂-Strahlung. In: Dissertation TH Darmstadt (1985)
- [88] Marsden, C. F.; Frenk, A.; Wagniere, J.-D.: Power absorption during the laser cladding process. In: Konferenz-Einzelbericht: Proceedings of the European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT '92, 1992, Göttingen. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft, 1992 (ISBN 3-88355-185-6), S. 375-380
- [89] Diniz Neto, O. O.: Physical-computational model to describe the interaction between a laser beam and a powder jet in laser surface processing. In: Journal of Laser Applications. (2002) Vol. 14, No. 1, Feb. 2002, S. 46-53
- [90] Lin, J.: Laser attenuation of the focused powder streams in coaxial laser cladding. In: Journal of Laser Applications. (2000) Vol. 12, No. 1, Feb. 2000, S. 28-33
- [91] Mie, G.: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloider Metalllösungen. In: Ann. Phys. IV, (1908), S. 377-445
- [92] Cox, A. J.; DeWeerd, A. J.; Linden, J.: An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections. In: American Journal of Physics. (2002), 70 (6), S. 620-625
- [93] Bohren, C.; Huffmann, D.: Absorption und Scattering of Light by Small Particles. New York: Wiley, 1984 (ISBN 0-471-05772-X)
- [94] Van de Hulst, H. C.: Multiple Light Scattering – Vol. 2. In: Academic Press, New York, London, Toronto, Sydney, San Francisco, 1980
- [95] Gasser, A.: Oberflächenbehandlung metallischer Werkstoffe mit CO₂ – Laserstrahlung in der flüssigen Phase. In: Dissertation Universität Aachen. 1. Auflage. Mainz: Mainz, 1993. – ISBN 3-930085-11-9
- [96] Hügel, H.; Bohn, W. L.: Solid State Thin Disc Laser. Spie Vol. 3574; 1998, S. 15-28

- [97] Contag, K.; Karszewski, M.; Stewen, C. et al.: Theoretical modelling and experimental investigations of the diode-pumped thin-disk Yb:YAG laser. In: Quantum Electronics, Vol. 29, No. 8, 1999, S. 697-703
- [98] Giesen, A.; Erhard, S.; Karszewski M. et al.: Der Scheibenlaser mit neuem Pumpdesign - Erste Ergebnisse. LaserOpto 31(1), 1999, S. 36-39
- [99] Giesen, A.; Hügel, H.; Voss, A. et al.: Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers. Appl. Phys. Vol. 58, 1994, S. 365-375
- [100] Erhard, S.; Giesen, A.; Karszewski, M. et al.: Novel Pump Design of Yb:YAG Thin Disc Laser for Operation at Room Temperature with Improved Efficiency. In: OSA TOPS Vol. 26, 1999, S. 38-44
- [101] Hill, P.: Thinking thin. In: Opto and Laser Europe, Vol. 80, 2000, S.27-30
- [102] Mästle, R.; Giesen, A.; Hügel H.: Genormte Messverfahren zur Laserstrahlcharakterisierung / Standard measurement procedures for laser beam characterization. In: LaserOpto, Vol. 32, No. 3, 2000, S. 44-49
- [103] Herstellerangaben der Universität Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne 58, rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France
- [104] Herstellerangaben der Firma Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover
- [105] Powitz, H.; Leschonski, K.; Benker, B.: A centrifugal crossflow classifier for cut sizes in the submicron range. In: ECCE 1, Florence, May 4-7, 1997, S. 861-864
- [106] Patentschriften DE 197 54 136 A1 und WO 99/29432
- [107] Matsusaka, S.; Motohiro, U.; Hiroaki, M.: Micro-feeding of fine powders using a capillary tube with ultrasonic vibration. In: Advanced Powder Technology, Vol. 6, No. 4, 1995, S. 284-293
- [108] Herstellerangabe der Firma ZIROX Sensoren & Elektronik GmbH, Am Koppelberg 21, D-17489 Greifswald

- [109] Herstellerangaben der Firma Jurca Optoelektronik GmbH & Co. KG, Raiffeisenstr. 5, D-63110 Rodgau
- [110] Herstellerangaben der Firma LASER 2000 GmbH, Argelsrieder Feld 14, D-82234 Wessling
- [111] Herstellerangaben der Firma Scientific Precision Instruments GmbH, Wormser Str. 32, D-55276 Oppenheim
- [112] Bunte, J.: Laserstrahlschweißen pulvermetallurgisch hergestellter Aluminiumschäume. In: Fortschritt-Berichte VDI; Reihe 2; Nr. 613; ISBN 3-18-361302-6; 2002
- [113] Danzer, W.; Härtl, J.: Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Diodenlaser. In: 5. Konferenz Strahltechnik, SLV Halle 27, 27.-28.11.2001, Tagungsband S. 126-131
- [114] Murphy, W. K.; Sears, G. W.: Production of Particle Beams. In: Journal of Appl. Phys. (1964) Vol. 85, S. 1986-1987
- [115] Davis, W. D.: Continuous Mass Spectrometer of Airborne Particulates by Use of Surface Ionization. Environ. Sci. Technol. 11, (1977) S. 587-592
- [116] Johnston, M. V.; Wexler, A. S.: Mass spectrometry of Individual Aerosol Particles. In: Anal. Chem. 67, 1995, S. 721A-726A
- [117] Murphy, D. M.; Thomson, D. S.: Laser Ionization Mass Spectrometry of Single Aerosol Particles. In: Aerosol Science and Technology 22, 1995, S. 237-249
- [118] Noble, C. A.; Prather, K. A.: Real-Time Measurement of Correlated Size and Composition Profiles of Individual Atmospheric Aerosol Particles. In: Environ. Sci. Technol. (1996) Vol. 30, S. 2667-2680
- [119] Jayne, J. T.; Leard, D. S.; Zhang, X. et al.: Development of an Aerosol Mass Spectrometer for Size and Composition Analysis of Submicron Particles. In: Aerosol Science and Technology. (2000) 33, S. 49-70

- [120] Tobias, H. J.; Kooima, P. M.; Dochery, K. S. et al.: Real-Time Chemical Analysis of Organic Aerosol Using a Thermal Desorption Particle Beam Mass Spectrometer. In: *Aerosol Science and Technology*. (2000) 33, S. 170-190
- [121] Israel, G. W.; Friedlander, S. K.: High Speed Beams of Small Particles. In: *J. Colloid Interface Sci.* (1967) 24, S. 330-337
- [122] Estes, T. J.; Vilker, V. L.; Friedlander, S. K.: Characteristics of a Capillary Generated Particle Beam. In: *J. Colloid Interface Sci.* (1983) 93, S. 84-94
- [123] Mallina, R. V.; Wexler, A. S.; Johnston, M. V.: High Speed Particle Beam Generation: Simple Focusing Mechanisms. In: *J. Aerosol Sci.*, 1999, Vol. 30, No. 6, S. 719-738
- [124] Dahneke, B. E.; Cheng, Y. S.: Properties of Continuum Source Particle Beam: I. Calculation and Methods and Results. In: *J. Aerosol Sci.*, 1979, Vol. 10, No. 10, S. 257-274
- [125] Rao, N. P.; Navascues, J. ; Mora, J. F.: Aerodynamic Focusing of Particles in Viscous Jets. In: *J. Aerosol Sci.*, 1993, Vol. 24, No. 7, S. 879-892
- [126] Kievit, O.; Weiss, M.; Verheijet P. J. T. et al.: The On-Line Chemical Analysis of Single Particles Using Aerosol Beams and Time of Flight Mass Spectrometer." *Chem. Eng. Comm.* Vol. 151, 1996, S. 79-100
- [127] Liu, P.; Ziemann, P. L.; Kittelson, D. B. et al.: Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions. In: *Aerosol Sci. Technol.* 22, 1995, S. 293-313
- [128] Schreiner, J.; Voigt, C.; Mauersberger, K. et al.: Aerodynamic Lens System for Producing Particle Beams at Stratospheric Pressures. In: *Aerosol Sci. Technol.*, 1998, Vol. 29, 1998, S. 50-56
- [129] Schreiner, J.; Schild U.; Voigt, C. et al.: Focusing of Aerosol into a Beam at Pressures from 10 to 150 Torr. In: *Aerosol Sci. Technol.*, 1999, Vol. 31, S. 373-382

- [130] Fernandez de la Mora, J.; Rosell-Llompart, J.; Riesco-Chueca, P.: Aerodynamic focusing of particles and molecules in seeded supersonic jets. In: Rarefied Gas Dynamics, Physical Phenomena, Vol. 117 of Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, USA, 1989, S. 247-277
- [131] Ashkenas, H.; Sherman, F. S.: The structure and utilization of supersonic free jet in low density wind tunnels. In: Proc. 4th Symp. on Rarefied Gas Dynamics, 1964, Vol. 2, S. 84-105
- [132] Shapiro, A.: Compressible Fluid Flow. In: The Ronald Press Company. (1953) Vol. 1
- [133] Abbas, M. A.; Crowe, C. T.: The effect of particle size and concentration on the flow properties of a homogeneous slurry. In: ASME-FED. (1986) Vol. 38, S. 108-112
- [134] Soo, S. L.: Slurry flow modelling and its effect of concentration. In: ASME-FED. (1986) Vol. 38, S. 1-8
- [135] Molerus, O: The role of science in particle technology. In: Powder Technology. (2002), 122, 2-3, S. 156-167
- [136] Davies R.: Particle science and technology - a view at the millennium. In: Powder Technology. (2001), 119,1, S. 45-57
- [137] Ishiia, Y.; Isoyaa, A.; Arakawaa, K. et al.: Development of a sub-micron ion beam system in the keV range. In: Nuclear Instruments and Methodes in Physics Research Section B, 2001, Vol. 181, No.1/4, S. 71-77
- [138] Kirchauer, H.: Photolithography Simulation. Dissertation Technische Universität Wien. Wien: Österr. Kunst- und Kulturverl., 2000 (ISBN 3-85437-204- 3)
- [139] Cassettari, D.; Chenet, A.; Folman, R. et al.: Micromanipulation of neutral atoms with nanofabricated structures. In: Appl. Phys., 2000, Vol. 70, S. 721-730
- [140] Dekker, N. H.; Lee, C. S.; Lorent, V. et al.: Guiding Neutral Atoms on a Chip Phys.Rev. Lett., 2000, Vol. 84, No. 6, S. 234-245

- [141] Opat, G. I.; Wark, S. J. and Cimmino, A.: Electric and Magnetic Mirrors and Gratings for Slowly Moving Neutral Atoms and Molecules. In: Appl. of. Phys., 1992, Vol. 54, S. 396-402
- [142] Sickafoose, A.; Colwell, J.; Horanyi, M. et al.: Photoelectric charging of dust particles in vacuum. In: Phys Rev Lett., 2000, Vol. 84, No. 26, S. 6034-6037
- [143] Kersten, H.; Deutsch, H.; Otte, M. et al.: Micro-disperse particles as probes for plasma surface interaction. Thin Solid Films, 2000, S. 377-378
- [144] Incluet, I.: Particle charging in a DC corona field. In: IEEE Trans. on electrical insulation, 1982, Vol. E1-17, No. 2, S. 168-171
- [145] Hussin, A.: Experimentelle Studien zur Ladungsverteilung monodisperser Aerosole in verschiedenen bipolaren Ionenatmosphären. Dissertation Universität Giessen, 1983
- [146] Fuchs, N. A.: On the Stationary Charge Distribution on Aerosol Particles in a Bipolar Ionic Atmosphere. In: Geophys Pura Appl., 1963, Vol. 56, S. 185-193
- [147] Internet: <http://www.ciw.uni-karlsruhe.de>; hinterlegt im Scriptum GPS; Kap. 8
- [148] Byung, J. Y.: Continuum theory for ionic field charging of spheroidal aerosols in nonuniform electric field. In: Chemical Engineering Science, 2000, Vol. 55, No. 22, S. 5485-5495
- [149] Bailey, A. G.: Charging of Solids and Powders. In: Journal of Electrostatics, 1993, Vol. 30, S. 167
- [150] Happer, W. R.: Contact and Frictional Electrification. London: Oxford University Press, 1967
- [151] Zhao-Zhi, Y.; Watson, K.: Two-step model for contact charge accumulation. In: Journal of Electrostatics, 2001, Vol. 51-52, S. 313-318
- [152] Malaske, U.; Tegemkamp, C.; Henzler, M. et al.: Defect-induced band gap states and the contact charging effect in wide band gap insulators. Surf. Sci., 1998, S. 408

- [153] Bailey, A. G.: Electrostatic Spraying of Liquids. New York: John Wiley & Sons Inc., 1988
- [154] Lochmann, M.: Herstellung von Partikeln durch elektrostatische Zerstäubung von Flüssigmetallen in gasförmiger Umgebung. Dissertation Gerhard-Mercator-Universität, Fachbereich 7, Duisburg, 2000
- [155] Bologna, A.; Paur, R.-H.; Waaschert, T.: Electrostatic charging of aerosol as a mechanism of gas cleaning from submicron particles. In: Filtration and separation, 2001, Vol. 38, S. 26-30
- [156] Rimai, D. S.; Demejo, L. P.: Physical Interactions Affecting the Adhesion of Dry Particles. In: Annu. Rev. Mater. Res., 1996, Vol. 26, S. 21-41
- [157] Pauthenier, M.; Moreau-Hanot, M.: La Charge des Particules Spheriques dans une champs Ionise. In: Journal de Physique, 1932, Vol. 1, No. 12, S. 590-615
- [158] Smith, W. B.; Mc Donald, J. R.: Development of a theory for the charging of particles by unipolar ions. In: J. Aerosol Sci., 1976, Vol. 7, S. 151-166
- [159] Liu, P.; Kapadia, A.: Combined field and diffusion charging of aerosol particles in the continuum regime. In: J. Aerosol Sci., 1977, Vol. 9, S. 227-242
- [160] Lawless, P. A.: Modeling of Electrostatic Precipitator – Charging, Collection, Rapping and Reentrainment. In: 5th ICESP, Washington D.C./USA 1993
- [161]. Law, E.: Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century. In: Journal of Electrostatics. (2001) Vol. 51-52, S. 25-42
- [162] Selenou Ngomsi, A.; Romat, H.; Artana, G.: Experimental study on the Specific Electrical Charge of the Droplets of a High Velocity Electric field. In: Journal of Electrostatics, 1997, Vol. 40-41, S. 609-614
- [163] Fan, L. S.; Zhu, C.: Principles of Gas-Solid Flows. In: Cambridge series in chemical engineering, 1998, S. 112

- [164] Sommerfeld, M.; Böttner, C.-U.; Domnick, J. et al.: Wechselwirkungen zwischen Elektrostatik und Strömungsmechanik bei der Herstellung dünner Pulverschichten. In: Abschlußbericht zum Vorhaben 01 RV 9619, August 2000
- [165] Ye, Q.; Steigleder, T.; Scheibe, A. et al.: Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun. In: Journal of Electrostatics, 2002, Vol. 54 (2), S. 189-205