

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

J. Sigel
Lasergenerieren metallischer Bauteile
mit variablem Laserstrahldurchmesser
in modularen Fertigungssystemen

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fertigungssystemen

von Dr.-Ing. Julian Sigel
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2006

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2006

ISBN 3-8316-0572-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung

Beim **Lasergenerieren** wird durch einen Laserstrahl auf der Oberfläche eines metallischen Werkstücks ein Schmelzbad erzeugt, in das gezielt pulverförmiger Zusatzwerkstoff eingebracht wird. Es entsteht eine raupenförmige Beschichtungsspur, deren Geometrie im Wesentlichen durch den Brennfleckdurchmesser und den in das Schmelzbad eingebrachten Massenstrom bestimmt ist. Das Lasergenerieren zielt darauf ab, durch übereinanderlegen mehrerer Spuren dreidimensionale, oft schmale und unterbrochene Volumenstrukturen mit homogenen Materialeigenschaften und möglichst geringen Formabweichungen gegenüber der Sollkontur bei minimaler Einschmelztiefe zu erzeugen. Die dazu notwendigen Prozesszeiten können bis zu mehreren Stunden betragen und machen einen hohen Automatisierungsgrad unabdingbar.

Für die **Erweiterung der geometrischen Flexibilität** des Prozesses zur Erhöhung von Form- und Maßgenauigkeiten der Bauteile werden in dieser Arbeit grundsätzliche Betrachtungen zur **gezielten Variation der Spurbreite** während des Prozesses in einem Bereich von 0,6 bis 2,4 mm bei konstanten Spurbhöhen und konstanter Vorschubgeschwindigkeit angestellt. Die beschriebene experimentelle Anlagenkonfiguration ist mit unidirektionaler Pulverzufuhr so gewählt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Spurbreite und **aufgeschmolzenem Pulvermassenstrom** besteht. Eine aktive Anpassung des geförderten Massenstroms an den variierenden Laserstrahldurchmesser ist damit nicht erforderlich. Für eine Prozesscharakterisierung werden aus **Hochgeschwindigkeitsaufnahmen** prinzipielle Schlussfolgerungen für die Bearbeitungsstrategie abgeleitet, um instationäre Prozessphasen am Spuranfang und damit die Abweichungen der Spurgeometrien von den Sollquerschnitten zu minimieren.

Nach diesen prinzipiellen Betrachtungen wird das **Konzept eines modularen Fertigungssystems** vorgestellt. Damit ist es möglich, je nach Werkstoff, geometrischer Komplexität und funktionalen Eigenschaften einer spezifischen Teilefamilie verschiedene Komponenten aus einem „Baukasten“ zu einem passenden Fertigungssystem zusammenzustellen. Die **beispielhaften Realisierungen in Laboranlagen** auf einem Dreh- und einem Fräszentrum umfassen Leitrechner, variable Laserbearbeitungsoptik für die Strahldurchmesservariation, Pulverförderer, fasergekoppelte Laserstrahlquelle sowie Sensormodule für Temperaturregelung und Schichthöhenkontrolle.

Den Abschluss der Ausführungen bilden einige beispielhafte Bauteile, die auf den beschriebenen Fertigungssystemen aus Fräs- und Drehzentrum hergestellt werden können. Hierzu werden alternierende Verfahrensfolgen aus Lasergenerieren und Spanen sowie der Einsatz von Strahldurchmesservariation, Laserleistungsregelung und Schichtdickenmessung aufgezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Symbolverzeichnis	11
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Bedarf an laserintegrierten Fertigungssystemen	17
1.2 Ziel dieser Arbeit	19
2 Stand der Technik	21
2.1 Laserbeschichten versus Lasergenerieren	21
2.1.1 Gemeinsames Verfahrensprinzip	21
2.1.2 Unterscheidungsmerkmale	22
2.2 Lasergenerieren	24
2.2.1 Verfahrensmerkmale	24
2.2.2 Grund- und Folgeschichten	24
2.2.3 Verfahrensvarianten	25
2.2.4 Zusatzwerkstoffe	31
2.2.5 Ähnliche Verfahren	32
2.3 Parametereinflüsse auf den Spurquerschnitt	32
2.3.1 Laserstrahlung	33
2.3.1.1 Strahlquerschnitt	33
2.3.1.2 Leistungsdichte	34
2.3.1.3 Leistungsdichteverteilung	34
2.3.2 Zusatzwerkstoff	36
2.3.2.1 Eigenschaften und Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffs	36
2.3.2.2 Partikeldurchmesser	37
2.3.2.3 Partikelform	37
2.3.2.4 Pulvernutzungsgrad und Pulverdüsenanordnung	38
2.3.3 Wechselwirkungszeit	38
2.3.4 Schutzgas	39
2.4 Systemtechnik	39
2.4.1 Laserintegration in Werkzeugmaschinen	39
2.4.2 Pulverförderung	40
2.4.3 In-situ-Prozesskontrolle und -regelung	41

3	Lasergenerieren variabler Spurquerschnitte	43
3.1	Grundlagen	43
3.2	Spezifische Optimierung	45
3.2.1	Zielrichtung	45
3.2.2	Konstante Parameter	47
3.2.3	Variable Parameter und Steuerungsmöglichkeiten	48
3.2.4	Pulverzufuhr und Pulvernutzungsgrad	50
3.2.5	Werkstoffe	53
3.3	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	56
3.3.1	Aufschmelzen der Partikel	57
3.3.2	Spurentstehung	59
3.3.2.1	Spurstart	59
3.3.2.2	Spurende	65
3.3.3	Schlussfolgerungen für die Bearbeitungsstrategie	65
4	Das Konzept eines modularen Fertigungssystems	67
4.1	Modulares Softwarekonzept	69
4.2	Steuerungs- und Datenkonzept des Leitrechners	70
4.3	Handhabungssystem	74
4.3.1	Drehzentrum	74
4.3.2	Fräszentrum	74
4.4	Laserstrahlquelle	74
4.5	Variable Laserbearbeitungsoptik	76
4.5.1	Anforderungen	76
4.5.2	Optisches Konzept	77
4.5.3	Konstruktive Umsetzung	79
4.5.4	Justage und Kalibrierung	81
4.5.5	Steuerung	82
4.5.6	Messwerte	82
4.6	Pulverzufuhr	84
4.6.1	Pulverförderer	84
4.6.2	Steuerung	86
4.6.3	Pulverdüse	86
4.7	Prozesskontrolle und -regelung	87
4.7.1	Temperaturregelung	88
4.7.1.1	Detektierter Wellenlängenbereich	89
4.7.1.2	Messfeld	90
4.7.1.3	Temperaturverteilung	91
4.7.1.4	Modellierung des Messsignals	93
4.7.1.5	Messwerte	96
4.7.1.6	Regelrechner	97
4.7.2	Schichtdickenkontrolle	98
4.7.2.1	Anforderungen	98
4.7.2.2	Sensor	100
4.7.2.3	Kalibrierung	102
4.7.2.4	Messwerte	103

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	9
4.7.2.5 Bewertung des Messsystems	104
5 Ergebnisse aus den Laboranlagen	105
5.1 Drehzentrum	105
5.2 Fräszentrum	109
6 Zusammenfassung	112
Literaturverzeichnis	116
Danksagung	131

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
Lateinische Buchstaben		
b_S	Spurbreite	mm
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	m/s
d_a	Außendurchmesser	mm
d_i	Innendurchmesser	mm
d_L	Laserstrahldurchmesser auf dem Werkstück	mm
d_P	Pulverdüsendurchmesser	mm
d_{Partikel}	Partikeldurchmesser des Zusatzwerkstoffs (Fraktionierung)	μm
d_s	Scheiteldicke einer Linse	mm
D	Laserstrahldurchmesser auf einer Linse	mm
D_L	Limbdurchmesser	mm
e	Gesamtabstand zwischen erstem und letztem optischen Element	mm
E_A	Energiedichte	J/mm^2
f	Brennweite	mm
F_L	Querschnittsfläche des Laserstrahls auf dem Werkstück	mm^2
F_S	Spur- oder Spurstapelquerschnittsfläche	mm^3
h	PLANCK-Konstante (PLANCKsches Wirkungsquantum)	J·s
h_S	Spurhöhe	mm
$\overline{HH'}$	Abstand der Hauptebenen eines optischen Elements	mm
I	Leistungsdichte	W/cm^2
I_θ	detektierte Leistungsdichte	W/cm^2
k	BOLTZMANN-Konstante	J/K
l_P	Abstand der Pulverdüse von der Werkstückoberfläche	mm
m_F	aufgeschmolzene Pulvermasse pro Fläche (spezifische Pulvermasse)	g/mm^2
\dot{m}_L	aufgeschmolzener Pulvermassenstrom	g/min
\dot{m}_P	geförderter Pulvermassenstrom	g/min
n	Spuranzahl in einem Spurstapel	–
$n_{1064 \text{ nm}}$	Brechungsindex für Nd:YAG-Laserwellenlänge	–
P_L	Laserleistung	W
P_λ	spektrale Strahlungsleistung	W
$t_{1,2,\dots}$	fortschreitende Zeitpunkte	s
t_S	Startzeitpunkt	s
t_w	Wechselwirkungszeit	s
T	Temperatur	K

Symbol	Bedeutung	Einheit
T_0	Umgebungstemperatur	K
T_{max}	Maximaltemperatur	K
T_S	Schmelztemperatur	K
v	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
v_P	Partikelgeschwindigkeit	mm/s
\dot{V}_S	Volumenstrom des Schutzgases	l/min
\dot{V}_T	Volumenstrom des Transportgases	l/min
z_0	Fokuslage	mm

Griechische Buchstaben

α_P	Pulverdüsenwinkel zur Horizontalen	°
β_P	Divergenzwinkel des Pulverstrahls	°
η_P	Pulvernutzungsgrad	–
γ_S	Startwinkel	°
λ	Wellenlänge der Laserstrahlung	nm
ϑ	Transmissionsgrad optischer Filter	–
ϱ_P	Dichte des Zusatzwerkstoffs	g/cm ³
ζ	Formverhältnis des Spurquerschnitts	–

Extended Abstract

During laser generating processes, a laser beam is used to create a melt pool on the surface of a metallic component. Powderized metallic materials are added to this pool in a targeted manner. The result is a bead-like cladded track where the geometry is primarily determined by the diameter of the laser spot and the mass flow induced in the melt pool. Laser generating processes aim at creating three-dimensional volume structures (sometimes rather small and interrupted) with homogenous material characteristics by overlaying of several tracks. The goal is to have the lowest possible level of shape deviation in comparison to the nominal contour at minimum remelted zone depth. The process time required to this end can amount to several hours and enforce an indispensable higher level of automation.

In order to extend the geometric leeway of laser generating processes, an option is being presented that enables laser spot diameter modification. This changes the width of the material tracks generated during the process. The efforts required for a variation of the laser beam diameter are however closely linked to the number of equipment-related and process-oriented parameters requiring modification as well. Therefore, the most logical compromise must be reached with regard to relatively low equipment-related expenditures and optimally adapted process parameters for the area of beam-material-interaction. Thus, all considerations are established on the basis of the following marginal conditions:

1. The track width to be realized is located in the fine-tuned area of 0.6 to 2.4 mm. Coarser structures can usually be generated relatively easy and way faster by means of metal-cutting machining.
2. For simple data processing and process guidance, constant track height (clad height) is aimed at for the layered structure of a component irrespective of the track width. In general, these will be some tenth of a millimeter high.
3. Work is effected with constant beam velocity. Thus, integration in different handling systems is made easier. However, with a varying beam diameter, different times of beam-material-interaction do evolve.

It is obvious that no optimized process – a process characterized by ideal conditions for the area of beam-material-interaction e.g. with reference to utilization of powder, velocity, or use of energy – can be expected under these circumstances. In fact, the generating process is running stable here, however, it is not within the efficiency optimum range. Here, the definition of *optimum process parameters* is first of all determined by adherence to shape as well as the material quality of the machined final product.

In order to generate a constant track height, the additional material mass applied, namely the powder feed rate, per surface unit must be constant too. For a wider range, a linear dependency

evolves between the beam diameter (track width) and the actual melt-on powder mass flow used for the process in the context of the selected equipment configuration with unidirectional powder supplies. Consequently, an active adaptation of the required mass flow to the varying beam diameter is not necessary.

High-speed shots have been made for process characterization during the transient phase after the point of actuation of the laser beam. The characteristic timelines for a beam velocity (feed speed) of 600 mm/min were derived from that. It becomes visible that at the power density applied, there is no superficial fusion of the used iron based powder on its way from the powder nozzle to the melt pool. Also with consecutive tracks, a significant tipping of the melt pool perpendicular up to 90° could be monitored. This process does primarily determine the length of the transient condition in the course of the track start. Moreover, monitoring results come up to a general conclusion that applies for the machining strategy in order to minimize transient process times and thus in parallel minimize the deviations from the track geometry of the nominal cross-sections:

- In order to minimize the start point offset of the track on flat substrate material, the laser beam can already be engaged at an earlier point in time. The distance to be run is below the stated conditions at 35 up to 44 % of the beam diameter. Highly effective is the fast creation of an initial melting zone which can be obtained by high power density setting at small beam diameters and with subsequent fast correction of these parameters, namely, by re-setting them to the desired values of the nominal contour.
- In order to minimize delay in consecutive tracks caused by the tipping of the melt pool forward edge during the starting phase, prior milling off of the upper material layer proves highly effective. Thus, the similar opportune conditions for consecutive tracks are created at the contour edges just as on flat substrate material.
- The effects of heat accumulation caused by reduced heat transmission at the contour edges and the thereof resulting widening of track can be efficiently decreased by the adaptation of the laser power such as e.g. by using a device for controlling the laser power.

In line with these general considerations, the concept for a modular production system is presented. Thus, it becomes possible – depending upon the material, geometric complexity, and the functional characteristics of specific part families – to use various components from a modular kit in order to create the suitable production system. Turning or milling centers can be used as platforms and/or handling systems, but shaping technology equipment and robot cells as well. And with only little effort, these will be equipped with optic devices and inlet lines for shielding and machining gases as well as powder materials in the working room. Thus, facilities are created that master any given machining order of selected traditional metal-cutting and laser-based procedures without complex upstream tooling preparations (such as e.g. cast molds) and without the respective tool setting times. These facilities will then be enabled to produce parts with geometric and functional characteristics (e.g. changes of material properties) in only as few clampings as truly needed.

This modular principle is explained on the basis of an exemplary implementation setting in the laboratory. The basis for that was provided by use of a turning and a milling center, respectively. Connected to these was a master computer which controlled subordinate modules such

as e.g. variable laser machining optical devices, the powder feeder, and the laser beam source. Moreover, the system was completed by sensor modules for temperature control and clad thickness monitoring. The special characteristics of the individual modules are made up by the fact that they own a certain level of intelligence and far-reaching independence as subordinate systems with a defined interface and their own respective control unit. On the basis of the modular principle, this complex overall system is subdivided into more simple sub-systems. The control programs are primarily made up of multiple-use object-oriented programmed software modules.

In addition to the laser beam source – which is made up by a glass-fiber reinforced solid-state or diode laser beam – and the powder feeder, the optic device applying variable laser spot sizes is the most important module of the laser generating system. It offers a continuously variable controllable reproduction scale of 1:1 up to 4:1. When using a standard glass fiber with 0.6 mm core diameter, this results in a beam diameter focusing on the workpiece of approximately 0.6 up to 2.4 mm. At the same time, the homogenous distribution of power density, delivered by the glass fiber, is maintained at any point in time and the stand-off working distance remains constant.

A temperature sensor on the basis of a photodiode is used as a core part of the module for laser power control. With the pre-established configuration depending upon the melting pool temperature and size, the modeling and analysis of the detecting radiation leading to the corresponding sensor signal permits the following statements to be made:

- The detected radiation power is mostly generated by the maximum temperatures from the melting pool. Peripheral face parts in the measurement field with temperatures below 1,100 °C do only minimally impact the sensor signal.
- With an increase in the diameter of the beam and thus of the melting pool, the detected radiation power is constantly on the rise. Therefore, utilization of the sensor signal as input parameter for the control circuit appears to be very logical and is feasible.

For clad thickness regulation, a commercial touch-free measurement system is presented. The passive sensor is based on a special type of triangulation. Despite tougher conditions because of highly dynamic processes in the melting pool surface and shadowing effects or scattering of the powder particles, an online measurement was conducted of the tracks created at 0.7 mm width. These deviate at max. by $\pm 50 \mu\text{m}$ from the final contour determined in the duty scanning procedure.

The concluding section is established by some exemplary parts that were produced in the described production system made up by a milling and a turning center. To this end, alternating procedural sequences of laser generating and metal-cutting processes as well as the use of beam diameter variation, laser power regulation, and clad thickness measurements were highlight.

1 Einleitung

1.1 Bedarf an laserintegrierten Fertigungssystemen

Der Laserstrahl hat als Werkzeug in der industriellen Fertigungstechnik einen hohen Stellenwert erlangt. Seine Stärken kommen insbesondere in solchen Anwendungsfällen zum Tragen, in denen hohe Flexibilität bezüglich bearbeitbarer Werkstoffe und Geometrien einerseits, und guter Automatisierbarkeit andererseits gefordert wird. Die Bedeutung der Lasertechnik als „Schlüsseltechnologie“ [1], die neue Möglichkeiten zu erschließen vermag, wird besonders deutlich im Bereich der automatisierten Herstellung von Musterteilen, dem **Rapid Prototyping**¹ [2]: Dieses umfangreiche Themenfeld gewinnt in der industriellen Anwendung zunehmend an Bedeutung, und die Mehrzahl der kommerziell etablierten Rapid Prototyping-Verfahren basiert auf dem Einsatz von Laserstrahlung.

Bei der Herstellung von Kunststoff-Prototypen, zum Beispiel mit dem seit 1984 verfügbaren Verfahren der Stereolithographie, existieren heute Dank intensiver Entwicklungsarbeiten unterschiedlichster Institutionen nur noch geringe Einschränkungen bezüglich der aufbaubaren Geometrie-Vielfalt. Alle Ansätze zur automatisierten Fertigung von Einzelteilen aus **massivem Metall** bieten dagegen zum heutigen Zeitpunkt noch keine vergleichbare geometrische Flexibilität. Am weitesten entwickelt erscheint in dieser Hinsicht das lokale Sintern oder aufschmelzen von Metallpulver in einem Pulverbett mit dem Laserstrahl [3].

Die große Bedeutung, die Musterteilen aus Metall zukommt, liegt insbesondere in den breiten und bislang weitgehend unerschlossenen Anwendungsfeldern im Automobil- und Maschinenbau begründet. Die Aussicht auf automatisiert hergestellte Einzelteile, die ohne Zwischenschritte aus dem Zielmaterial Metall gefertigt werden können, lässt in einigen Anwendungsfällen als weiteren Schritt auch die **Produktion kleinerer Stückzahlen**, wie sie zum Beispiel für Klein- oder Nullserien in der Automobilindustrie oder für Sonderanfertigungen im Werkzeug- und Anlagenbau benötigt werden, als mögliche und sinnvolle Anwendung erscheinen. Aber auch für die bereits heute in vielen Industriezweigen zu beobachtenden Bestrebungen, minimale Losgrößen wirtschaftlich herstellen zu können, zeigt den Bedarf an neuen Konzepten seitens der Fertigungstechnik. So werden beispielsweise Kunststoff-Steckverbinder heute bereits in Losgrößen zwischen 100 und 10 000 Stück mittels Selektivem Lasersintern (SLS) und Stereolithographie (SLA) produziert [4]. Langfristig wird es sicherlich auch Produkte oder Komponenten aus dem Maschinen- und Anlagenbau geben, bei denen die

¹Der Begriff Rapid Prototyping wird in dieser Arbeit als Oberbegriff für das gesamte Gebiet des automatisierten Musterteilebaus verwendet und schließt auch Rapid Tooling mit ein.

automatisierte Herstellung von kundenspezifischen Einzelteilen nach Bestelleingang („manufacturing on demand“, „e-manufacturing“, „rapid manufacturing“) wirtschaftlich und sinnvoll sein wird, ähnlich wie es heute zum Beispiel im digitalen Buchdruck bereits realisiert ist [5, 6].

Aus solchen Überlegungen heraus leitet sich der Bedarf an flexiblen Fertigungstechnologien ab, die nicht nur metallische Zielwerkstoffe ohne Zwischenschritte in die gewünschte geometrische Form zu bringen vermögen, sondern die darüber hinaus auch die Möglichkeit bieten, die Bauteile mit **funktionalen Merkmalen** wie zum Beispiel der Härtung von Funktionsflächen oder einer definierten Oberflächenstrukturierung auszustatten. Hier eröffnet sich ein Anwendungsfeld, für das der **Laserstrahl** als flexibles Werkzeug prädestiniert ist, insbesondere **in Kombination mit den konventionellen Methoden der Metallbearbeitung in laserintegrierten Werkzeugmaschinen zur Komplettbearbeitung**, wie sie zum Beispiel in [7] aufgezeigt wird. Die Palette der denkbaren Verfahren reicht in einer solchen Anlage von konventionell spanender oder umformender Bearbeitung über die Vielfalt der etablierten Laserverfahren wie Schweißen, Schneiden, Härten, Umschmelzen, Legieren, Beschichten, Abtragen (Strukturieren) oder Beschriften bis hin zu neueren laserbasierten Fertigungstechniken wie dem Lasergenerieren.

Dabei ist der Ansatz laserintegrierter flexibler Fertigungssysteme in seiner vollen Ausprägung als **umfassender Rahmen für untergeordnete Themenfelder** wie zum Beispiel laserintegrierte Komplettbearbeitung, Reparaturbeschichtung verschlissener Bauteile oder auch Rapid Prototyping zu verstehen. Das Themenfeld „Rapid Prototyping metallischer Teile“ eignet sich dabei aufgrund seiner Anforderung nach höchster geometrischer Flexibilität sehr gut dazu, weitere Schritte in Richtung laserintegrierter flexibler Fertigungssysteme zu initiieren.

Natürlich ist es weder notwendig noch zweckmäßig, *alle möglichen* Verfahrensvarianten in *einem einzigen* Fertigungssystem vorzuhalten. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Handhabbarkeit sollte die Zusammensetzung eines solchen Systems viel mehr auf die Anforderungen **einer Produkt- oder Teilefamilie** abgestimmt werden, wie sie branchen- oder produktpalettenspezifisch in der fertigungstechnischen Praxis meist anzutreffen ist. Beispiele für solche Teilefamilien sind Wellen, Blechteile oder Gesenke. Dies führt zu einem **modularen Aufbau flexibler Fertigungssysteme** sowohl hinsichtlich der Maschinen- als auch der Steuerungstechnik, der es erlaubt, ein spezifisches System aus einem „Baukasten“ vorhandener Funktionskomponenten zusammenzustellen.

Dem **Lasergenerieren** kommt zunächst sowohl im Zusammenhang mit Rapid Prototyping, als auch im Hinblick auf laserintegrierte Werkzeugmaschinen eine besondere Bedeutung zu. Zum einen ist es vom Prinzip her vielen der etablierten Rapid Prototyping-Verfahren ähnlich, weil neues Bauteilvolumen schichtweise aufgebaut wird. Dadurch können einige bereits bewährte Ansätze und Lösungen, zum Beispiel aus dem Software-Bereich, adaptiert werden. In eine Werkzeugmaschine integriert, bietet es neue Möglichkeiten bei der Auswahl der Halbzeuge und bei Verfahrensfolgen aus additiven und subtraktiven Bearbeitungsschritten. Daraus resultieren **wesentliche Erweiterungen der Grenzen** bisher konventionell fertiger Geometrien zum Beispiel für Hinterschnidungen oder für nicht-zylinderförmige Hohlräume und Bohrungen, die durch konventionelle Dreh- oder Bohrbearbeitung nicht ohne weiteres herstellbar sind.

1.2 Ziel dieser Arbeit

Die Vielzahl der im folgenden **Kapitel 2** betrachteten Veröffentlichungen zum Lasergenerieren zeigt das Potenzial auf, das von unterschiedlichsten Institutionen weltweit in dieser Möglichkeit zur schnellen Herstellung komplexer Metallteile gesehen wird. Ein vermehrter Einsatz dieser Technologie über das bis jetzt genutzte Maß an kommerziellen Nischenanwendungen hinaus setzt jedoch voraus, dass zum einen die **geometrischen Freiheitsgrade** des Prozesses weiter ausgebaut und zum anderen die praktische **Handhabbarkeit** zur Nutzung der flexibleren Möglichkeiten erleichtert wird. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, auf diesen beiden Feldern einen Beitrag zu leisten.

Zwar existieren aus den Arbeiten zum technologisch verwandten Laserbeschichten bereits eine breite Wissensbasis sowie verschiedene Prozessmodelle; für einige spezifische Aspekte, in denen sich das Lasergenerieren vom Laserbeschichten unterscheidet, sind jedoch noch weitere Untersuchungen zur Verbreiterung des bisherigen Einsatzspektrums notwendig. Dies betrifft vor allem eine **Erweiterung der geometrischen Flexibilität** des Prozesses und eine Erhöhung von Form- und Maßgenauigkeiten der generierten Bauteile. Durch die in dieser Arbeit gezeigte Möglichkeit, den Querschnitt einer lasergenerierten Spur gezielt zu beeinflussen, erlangt das Verfahren zusätzliche Flexibilität für unterschiedliche Anwendungsfälle. Wie bei den spanenden Fertigungsverfahren üblich, lässt sich damit auch der Materialauftrag in „Schrupp-“ und „Schlichtprozesse“ unterteilen, je nach dem, ob eine hohe Volumenleistung mit hoher Laserleistung, großem Strahldurchmesser und hohem Pulvermassenstrom gefordert wird, oder ob feine Strukturen nahe der Bauteil-Endkontur mit kleinem Strahldurchmesser generiert werden sollen. Des Weiteren kann im Falle des Reparaturbeschichtens der notwendige Spurquerschnitt optimal an das jeweils vorliegende Bauteil angepasst werden, zum Beispiel an großvolumige Gesenke oder an schmale Messerschneiden. Ist es – wie in dieser Arbeit vorgestellt – zudem möglich, den Spurquerschnitt *während* des Materialauftrags gezielt kontinuierlich zu verändern, so lässt sich die ohne Nachbearbeitung erzielbare Konturtreue generierter Bauteile weiter maximieren, was sich unmittelbar in erheblichen Einsparungen an Kosten und Zeit sowie einem minimalen Ressourcenverbrauch niederschlägt.

Kapitel 3 befasst sich deshalb mit den grundlegenden Zusammenhängen bei einer **gezielten Variation der Spurquerschnitte während des Lasergenerierens**. Ausgehend von der Vielzahl der signifikanten Prozessparameter wird ein praxistauglicher Rahmen aufgezeigt, in dem sich die Beeinflussung des Spurquerschnitts mit reproduzierbarem Ergebnis und mit in der Praxis vertretbarem gerätetechnischen Aufwand realisieren lässt. Weiterhin werden die Vorgänge beim Ein- und Ausschalten des Laserstrahls auf dem Werkstück analysiert. Insbesondere bei der Erzeugung von unterbrochenen Strukturen spielen diese als kurzzeitig instationäre Prozessphasen eine bedeutende Rolle, so dass sie hinsichtlich der erzeugten Geometrien einer besonderen Aufmerksamkeit bedürfen.

In **Kapitel 4** wird ein Konzept für modulare laserintegrierte Fertigungssysteme vorgestellt. Als **systemtechnischer Ansatz** wurden im labormaßstäblichen Rahmen dieser Arbeit steuerungstechnisch autarke Module entwickelt, die – je nach Bearbeitungsaufgabe – entsprechend eines „Baukastens“ gezielt ausgewählt und in spezifischen Anlagen miteinander kombiniert

werden können. Die Grundlage bildet dabei jeweils ein geeignetes Handhabungssystem, das die Teile zur Bearbeitung aufnimmt. Ideal ist dabei der Einsatz von konventionellen Werkzeugmaschinen, die mit der modularen Laserintegration sowohl konventionell spanende als auch lasergestützte Bearbeitungsschritte in einer Aufspannung erlauben und damit die Voraussetzungen für eine flexible Fertigungsfolge bieten.

Zu den realisierten Modulen, die je nach Anwendungsfall miteinander kombiniert werden können, gehört eine **variable Laserbearbeitungsoptik**, mit der sich die Spurbreitenvariation in der Praxis realisieren lässt. Diese Optik ist dabei so ausgelegt, dass neben dem Lasergenerieren auch andere Laser-Anwendungen durchgeführt werden könnten.

Um das Lasergenerieren in einem breiteren Spektrum praktischer Anwendungen einsetzen zu können, muss die Stabilität des Prozesses und die Reproduzierbarkeit des Bearbeitungsergebnisses gewährleistet sein. Da die Ergebnisqualität in diesem relativ empfindlichen Prozess jedoch wesentlich von äußeren Einflussfaktoren wie zum Beispiel Bauteilgeometrie oder -temperatur beeinflusst wird, kann die geforderte Stabilität nur mit geeigneten Methoden zur **Prozesskontrolle und -regelung** gewährleistet werden. Hierzu werden Module für die Regelung der Schmelzbadtemperatur und eine In-situ-Kontrolle der Schmelzbadhöhe vorgestellt.

Als Abschluss werden die auf den Laboranlagen erzielten **Ergebnisse** in **Kapitel 5** zusammengefasst. Als Handhabungssysteme eingesetzt wurden in dieser Arbeit ein Drehzentrum sowie ein HSC-Fräszentrum. Gezeigt werden für beide Anlagen typische Bauteilgeometrien, die die spezifischen Möglichkeiten und Grenzen dokumentieren.

2 Stand der Technik

2.1 Laserbeschichten versus Lasergenerieren

2.1.1 Gemeinsames Verfahrensprinzip

Beim Laserbeschichten und -generieren wird durch einen Laserstrahl ein lokal begrenztes Schmelzbad auf der Oberfläche eines metallischen Werkstücks erzeugt. Durch eine speziell gestaltete Zufuhreinrichtung wird metallischer Zusatzwerkstoff kontinuierlich in das Schmelzbad eingebracht und durch die Laserenergie aufgeschmolzen. Wird das Werkstück mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit unter dem Laserstrahl bewegt, wandert die Front des Schmelzbad über die Werkstückoberfläche, und es bildet sich eine raupenförmige „Spur“ aus Metall, die schmelzmetallurgisch mit dem Grundkörper verbunden ist. Dabei erstarrt das aufgetragene Material, nachdem es durch die Vorschubbewegung aus der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Grundmaterial heraus bewegt worden ist. Wie in **Bild 2.1** skizziert, kann die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstückoberfläche sowohl durch eine Lateralbewegung von ebenen Werkstücken, als auch durch Drehung von Rotationsteilen erzeugt werden. Durch Nebeneinanderlegen mehrerer Spuren werden flächige Materialschich-

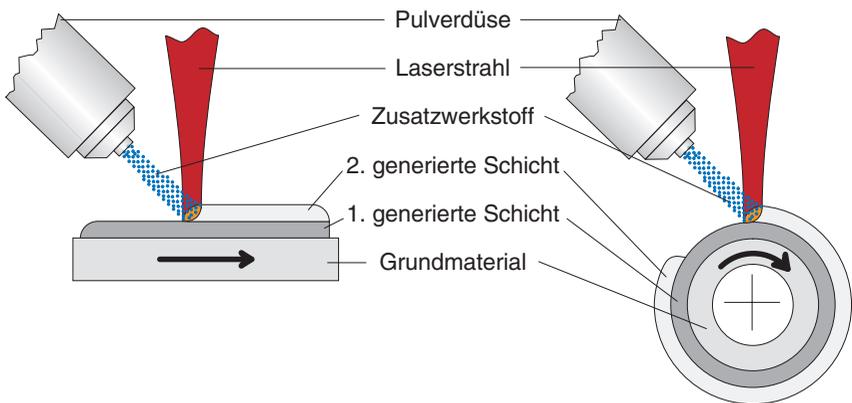


Bild 2.1: Prinzip des Laserbeschichtens bzw. des Lasergenerierens auf ebene und zylinderförmige Grundgeometrien mit unidirektionaler Zufuhr pulverförmigen Zusatzwerkstoffs.

ten hergestellt, und durch Übereinanderlegen mehrerer Schichten werden dreidimensionale Materialvolumina aufgebaut.

Um den schmelzflüssigen Werkstoff vor Oxidation zu schützen, muss das Schmelzbad in einer Atmosphäre aus Inertgas gehalten werden. Dies kann durch einen kontinuierlichen Strom von Schutzgas aus der Zusatzwerkstoffdüse geschehen, der auf das Schmelzbad gerichtet ist, oder durch den Ausschluss umgebender Luft innerhalb einer geschlossenen, mit Inertgas gefüllten Prozesskammer. Die so generierten Metallspuren weisen eine Dichte auf, die der des Zusatzwerkstoffs entspricht.

Seit der „Erfindung“ des Laserbeschichtens 1976 [8] wird diese Technologie systematisch untersucht [9] und industriell angewendet [10]. Heute befindet sie sich Dank zahlreicher Arbeiten auf diesem Gebiet in einem sehr weit fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. Von den unterschiedlichen untersuchten Variationen der Prozessführung hat sich der Einsatz von CO₂-Hochleistungslasern im Dauerstrich-Betrieb bewährt, mit der Verfügbarkeit ausreichend hoher Strahlleistung wurden nach und nach auch Nd:YAG- und Diodenlaser eingesetzt. Am häufigsten findet sich in der Literatur die Anwendung des einstufigen Verfahrens, bei dem der Zusatzwerkstoff simultan zur Laserbearbeitung dem Schmelzbad zugeführt wird. Dabei wird meist pulver- oder drahtförmiger, seltener pastenförmiger Zusatzwerkstoff verwendet. Je nach Art des Grundwerkstoffs und gewünschter Funktion der Randschicht können unterschiedlichste Legierungszusammensetzungen verarbeitet werden. Auf Stählen werden vor allem Nickel-, Kobalt- oder Eisen-Basislegierungen mit hohen Gehalten an hartstoffbildenden Bestandteilen wie Chrom, Wolfram, Molybdän oder Vanadin sowie zusätzlichen Hartstoffen wie Karbiden, Boriden oder Siliziden eingesetzt [11, 12]. Übliche Beschichtungswerkstoffe für Aluminiumsubstrate sind Aluminium-Silizium-, Nickel- oder Bronzelegierungen, die unterschiedliche Anteile von zusätzlichen Legierungsbestandteilen wie zum Beispiel Titan, Chrom oder Bor enthalten können [13].

2.1.2 Unterscheidungsmerkmale

Das Lasergenerieren zeichnet sich dadurch aus, dass durch Übereinanderlegen einzelner Spuren oder aus mehreren Spuren gebildeter Schichten metallische Volumina definierter räumlicher Geometrie erzeugt werden. Obwohl das Lasergenerieren auf den prozesstechnischen Grundlagen und Prinzipien des Laserbeschichtens beruht, ergeben sich die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale beider Verfahren **aus den Anforderungen an das Bearbeitungsergebnis und an den Bearbeitungsablauf**. Während beim Laserbeschichten die flächige Erzeugung funktionaler Randschichten im Vordergrund steht, zielt das Lasergenerieren auf den schichtweisen Aufbau geometrisch bestimmter dreidimensionaler Strukturen und Materialvolumina. Die wesentlichen Aspekte, anhand derer zwischen Laserbeschichten und Lasergenerieren unterschieden werden kann, sind in **Tabelle 2.1** aufgeführt.

Eine klare Abgrenzung ist in einigen Anwendungsfällen nicht immer möglich. Beim Reparaturbeschichten verschlissener oder ausgebrochener Partien an Metallbauteilen zum Beispiel

Anforderung hinsichtlich	... an das Laserbeschichten	... an das Lasergenerieren
Werkstück	geometrische Form weitgehend vollendet, manuelle Vorbehandlung der Oberfläche möglich, z. B. zur Erhöhung der Absorption	Grundkörper einfacher Geometrie, manuelle Vorbehandlung nur für 1. Schicht sinnvoll
Fläche/ Geometrie	Erzeugung geschlossener Flächen, oft großflächiges Beschichten	Erzeugung dreidimensionaler Volumenstrukturen, oft schmale und unterbrochene Spuren
Material-eigenschaften	funktionale Randschichteigenschaften, z.B. erhöhte Härte, Korrosionsbeständigkeit, Zähigkeit etc.	definierte homogene Eigenschaften des gesamten Materialvolumens, z.B. nahe an denen des späteren Serienmaterials
Maßhaltigkeit	endkonturnah, evtl. Aufmaß für Nachbearbeitung	Formabweichungen gegenüber der Sollkontur in definiertem Toleranzband
Bearbeitungs-ablauf	manuelle Maschinenbedienung bei Einzelteilen; Automatisierung nur bei großen Stückzahlen sinnvoll	Volumengenerierung führt zu langen Prozesszeiten, hoher Automatisierungsgrad deshalb unabdingbar
Einschmelz-tiefe	je nach Anforderungen an die Schichteigenschaften	minimal; sichere schmelzmetallurgische Verbindung des aufgetragenen Volumens

Tabelle 2.1: Unterschiedliche Anforderungen an das Laserbeschichten und das Lasergenerieren als Unterscheidungsmerkmale.

wird zum einen eine funktionale Werkstoffschicht auf eine weitgehend vollendete Werkstückgeometrie aufgebracht. Dies geschieht zum anderen jedoch in mehreren Lagen, um das fehlende Materialvolumen aufzufüllen.

In der **Prozessführung** unterscheiden sich Laserbeschichten und Lasergenerieren in erster Linie durch ihre spezifischen Parameterfelder, die sich nur zum Teil überlappen. Sie sind im Wesentlichen bestimmt durch die typischerweise eingesetzten Zusatzwerkstoffe, durch die unterschiedliche Größe der Wechselwirkungszone des Laserstrahls auf der Oberfläche sowie durch die implizite Vorwärmung des Werkstücks bei mehrlagigem Generieren. Weiterhin sind bei beiden Verfahren unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Optimierung der Prozessparameter auf die jeweils verwendete Anlage üblich: So wird beim großflächigem Laserbeschichten meist mit der von der jeweiligen Strahlquelle maximal verfügbaren Laserleistung gearbeitet und der Strahldurchmesser auf dem Werkstück so eingestellt, dass die gewünschte Energiedichte erreicht wird. Beim Lasergenerieren dagegen wird der Strahldurchmesser durch die zu erzeugende Struktur vorgegeben und die Laserleistung muss entsprechend angepasst werden.

2.2 Lasergenerieren

2.2.1 Verfahrensmerkmale

Der optimierte Prozess des Lasergenerierens und das Bearbeitungsergebnis lässt sich durch folgende Merkmale charakterisieren (vgl. [14]):

- Das generierte Materialvolumen weist ein **feinkörniges metallisches Gefüge** mit der **Dichte des Zusatzwerkstoffs** und ohne Poren oder Risse auf, es ergeben sich nahezu **isotrope Materialeigenschaften**;
- es sind geometrisch **definierte Spurquerschnitte** herstellbar;
- die schmelzmetallurgische Verbindung jeder Spur mit dem Grundwerkstoff bzw. den darunterliegenden Schichten ist durch eine **definierte Einschmelztiefe** gewährleistet;
- die lokal streng **begrenzte Wärmeeinbringung** minimiert den Bauteilverzug bzw. die Wärmeeinflusszone.
- Zudem handelt es sich beim Lasergenerieren um ein berührungsloses Verfahren, das **gut automatisierbar** ist und eine **große Flexibilität** hinsichtlich Werkstoff- und Geometriespektrum aufweist.

Da das flüssige Metall nach dem Verlassen der Wechselwirkungszone des Laserstrahls nicht wie bei Gießverfahren durch die geometrischen Randbedingungen einer vorgegebenen Form geprägt wird, sondern frei an der umgebenden Atmosphäre erstarrt, sind weiterhin folgende Merkmale impliziert:

- Die **Oberflächenrauigkeit** generierter Spuren lässt sich nicht beliebig minimieren und die erzielbaren Qualitäten hinsichtlich Maßhaltigkeit genügen meist nicht den Anforderungen technischer Bauteile. Typische Werte sind
 - für erzielbare Oberflächenrauigkeiten $R_a = 10$ bis $40 \mu\text{m}$,
 - für Abweichungen von der Sollkontur $\pm 0,1$ bis $0,35 \text{ mm}$,
 - für minimale Wandstärken $0,5$ bis $0,9 \text{ mm}$ und
 - für maximal erreichbare Wandschrägen 20 bis 30° bzgl. der Vertikalen [15].

Eine spanende Nachbearbeitung ist in vielen Anwendungsfällen notwendig.

- Durch die **frei erstarrende Schmelze** sind Hinterschneidungen oder Überhänge nicht oder nur in eingeschränkten Maßen möglich. Größere geometrische Freiheiten lassen sich mit sechsachsigen Handhabungsmaschinen erzielen, die das Werkstück unter einem feststehenden, parallel zur Schwerkraftrichtung nach unten gerichteten Laserstrahl bewegen. Die Spuren können so stets in Wannenlage mit senkrecht zur Werkstückoberfläche orientiertem Laserstrahl aufgebracht werden.

2.2.2 Grund- und Folgeschichten

Hinsichtlich der Prozessführung ist beim Lasergenerieren eine Unterscheidung zwischen der ersten auf den Grundkörper aufgetragenen Schicht und allen weiteren Schichten notwendig.

Zum einen enthält die Schmelze der Spuren der ersten Schicht auch **Legierungsbestandteile des Grundwerkstoffs**, während bei den Folgeschichten – unter Voraussetzung der üblichen, niedrigen Einschmelztiefen – von der Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffs ausgegangen werden kann. Zum anderen ändern sich die **Bauteiltemperatur** sowie die Mechanismen der Wärmeleitung, die den Wärmeverlust des Schmelzbads maßgeblich mitbestimmen: Beim Auftrag der ersten Schicht (Grundspuren) beträgt die Bauteiltemperatur für gewöhnlich Zimmertemperatur, und das Schmelzbad unterliegt – ausreichende Bauteilgröße vorausgesetzt – Verlusten aus dreidimensionaler Wärmeleitung in das Bauteilvolumen. Bei den Folgeschichten hingegen ist das Bauteil durch die vorangegangene Laserbearbeitung bereits vorgewärmt, und Wärmeleitungsverluste sind eher durch eindimensionale Wärmeleitung in die darunterliegenden Schichten bestimmt und entsprechend geringer. Die Ausprägung dieser Effekte hängt vor allem von Werkstoff und Geometrie des Grundkörpers sowie der aufgebauten Struktur ab und kommt extrem im Falle eines einfachen Spurstapels zum Tragen, wie er in **Bild 2.2** skizziert ist. Eine genaue Quantifizierung ist nur für spezielle Bauteilgeometrien möglich. Für die Grundspuren auf ein Halbzeug wird in [16] als pauschaler Ansatz empfohlen, entweder mit um 30 % verringerter Geschwindigkeit zu fahren oder den eingeschalteten Laserstrahl ohne Zusatzwerkstoffzufuhr einige Male zur Vorwärmung über die Oberfläche des Grundmaterials zu führen.

2.2.3 Verfahrensvarianten

Die ersten Veröffentlichungen zum expliziten Einsatz der Laserbeschichtungstechnologie für Rapid Prototyping finden sich 1993 von Arbeitsgruppen an den Universitäten in Liverpool [17], Michigan [18] und Aachen [19]. Seit diesem Zeitpunkt war das Lasergenerieren als universelle Möglichkeit der generativen Formgebung metallischer Bauteile bekannt, und es beschäftigten sich eine zunehmende Zahl von Forschergruppen mit diesem Thema. Meist wird für jede spezifische Verfahrensvariante von den jeweiligen Entwicklern eine besondere Bezeichnung publiziert. Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass alle hier vorgestellten Varianten auf der **gemeinsamen technologischen Grundlage** basieren, die in dieser Arbeit durchgehend als *Lasergenerieren* bezeichnet werden soll. Neben dem Rapid Prototyping stellt das mehrlagige Reparaturbeschichten von verschlissenen Bauteilen oder Werkzeugen eine wichtige Anwendung für das Lasergenerieren dar. Eine Übersicht zu den Arbeiten



Bild 2.2: Drei- (links) und eindimensionale Wärmeleitung (rechts) bei Grund- und Folgeschichten im Extremfall eines einfachen Spurstapels.

aus verschiedenen Forschungsinstituten gibt **Tabelle 2.2**, einige der Ansätze aus den USA werden in [20] zusammenfassend beschrieben.

Große Erfahrungen auf dem Gebiet des Laserbeschichtens führten an der University of Liverpool bereits sehr früh zur Entwicklung des Lasergenerierens für Rapid Prototyping. In [17] wird ein System aus CO₂-Laser und unidirektionaler Pulverzufuhr beschrieben, das in eine Fräsmaschine integriert wurde. Entsprechend wird ein Bauprozess von der Aufbereitung von Geometriedaten aus einem CAD-System über alternierende Bearbeitungsschritte aus Lasergenerieren und Fräsen bis zum fertigen Bauteil vorgestellt. Durch Aufnahmen der Oberflächenkontur mit einem geeigneten Scanner wurden aus den gemessenen Werkstückverformungen weiterhin Rückschlüsse auf die auftretenden Eigenspannungen während des Lasergenerierens gezogen. Die Analyse ergab insbesondere für schmale Spuren von wenigen Millimetern Breite nur geringe Spannungswerte [21]. Zur Erzeugung komplexerer Geometrien wurde die ursprünglich dreiaxiale Anlage um eine weitere Achse erweitert [22]; später kam ein sechsachsiges System mit koaxialer Pulverzufuhr bezüglich der optischen Achse des Laserstrahls zum Einsatz [23] und die Verfahrensbezeichnung **Laser Direct Casting** (LDC) wurde geprägt [24]. In weiteren Arbeiten wurde der Einfluss der unterschiedlichen Prozessparameter auf Spurgeometrien und Gefügestrukturen untersucht [25].

Die ersten Versuche an der University of Illinois, Urbana (USA), die Laserbeschichtungstechnologie für das Rapid Prototyping einzusetzen, fanden ebenfalls im Jahr 1993 mit CO₂-Laser und sowohl unidirektionaler als auch koaxialer Zufuhr von Aluminiumpulver statt [18, 26]. Die Arbeiten wurden später an der University of Michigan fortgesetzt und es wurde auch Werkzeugstahl verarbeitet [27]. Seit 1997 wird diese Verfahrensvariante unter der inzwischen geschützten Bezeichnung **Direct Metal Deposition** (DMD) weiterverfolgt [28, 29, 30]. Neuere Arbeiten beschäftigen sich mit der Anpassung der Schichthöhe an die zu fertigende Geometrie zur Erhöhung der erzielbaren Formgenauigkeit [31]. Regelmäßige Patentanmeldungen unter anderem auf dem Gebiet der Sensorik dokumentieren die kontinuierlichen Anstrengungen zur Steigerung der Bauteilqualität [32, 33, 34].

Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik in Aachen wurden die ersten Ansätze zum Lasergenerieren mit CO₂-Laser und unidirektionaler Pulverzufuhr begonnen [19]. Später kamen auch eine koaxiale Pulverzufuhr [35] sowie ein Nd:YAG-Laser zum Einsatz [36], und die Kombination des Lasergenerierens mit HSC-Fräsbearbeitung wurde eingeführt. Diese Entwicklung fand in Zusammenarbeit mit der Firma *Albrecht Röders GmbH*, Soltau, einem Hersteller von HSC-Fräsmaschinen, statt. Die Zielrichtung des mittlerweile **Controlled Metal Buildup** (CMB) getauften Verfahrens [37] ist in erster Linie die Herstellung von Spritzgusswerkzeugen [38]. Inzwischen werden entsprechende Anlagen kommerziell angeboten. Als Strahlquelle wird ein kompakter Diodenlaser mit einer maximalen Strahlleistung von 1000 W eingesetzt. Der Zusatzwerkstoff wird in Drahtform zugeführt [39]. Eine kommerzielle Anlage wird in Kombination mit konventionellem WIG-Schweißen zum Reparaturbeschichten von Spritzgusswerkzeugen eingesetzt [40]. Neben weiterer Optimierung des CMB-Verfahrens wird an einer prototypischen anlagentechnischen Umsetzung einer automatisierten Reparatur- und Änderungsfertigungszelle für den Werkzeug- und Formenbau gearbeitet. Ziel ist die durchgängige Prozesskette für Umformwerkzeugen, beginnend bei der Ermittlung der verschlissenen Werkzeugbereiche bis zum reparierten, einsatzfähigen Werkzeug.

Bezeichnung	Entwickler	Literatur
Laser Direct Casting (LDC)	University of Liverpool (GB)	[17, 21, 22, 23, 24, 25]
Direct Metal Deposition (DMD)	University of Michigan, Michigan (USA)	[26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]
Controlled Metal Buildup (CMB)	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik, Aachen	[19, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]
3D-Laserstrahl-Pulver-Auftragschweißen	Laserzentrum Hannover	[42, 43, 44, 45, 46, 47]
Laserstrahlgenerieren	RWTH Aachen, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen	[15, 48, 49, 50]
Shape Deposition Manufacturing (SDM)	Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh (USA), Stanford Univ., Stanford (USA)	[51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58]
Laser-Aided Direct Rapid Prototyping (LADRP)	University of Central Florida, Orlando (USA)	[59, 60, 61]
Laser Metal Forming (LMF)	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (CH)	[16, 62, 63, 64, 65, 66, 67]
3D-Laser-Auftragschweißen	Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden	[68, 69, 70, 71, 72]
Directed Light Fabrication (DLF)	Los Alamos National Laboratory, Los Alamos (USA)	[73, 74, 75, 76, 77, 78]
Free-Form Laser Consolidation	National Research Council Canada, Ontario (CA)	[79, 80]
LaserCast, Laser Freeforming	Penn State University, State College (USA)	[81, 82, 83]
Lasform oder LaserCast	Johns Hopkins University, Laurel (USA)	[84]
Laser Metal Deposition	MTS Systems Corp., Eden Prairie (USA)	[85, 86]
Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Sandia National Laboratories, Albuquerque (USA)	[87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95]
Wirefeed Process	Sandia National Laboratories, Albuquerque (USA)	[104]
Precision Metal Deposition (PMD)	H&R Technology Inc., Lowell (USA)	[105, 106]
Direct Light Fabrication	University of Birmingham (GB)	[107, 108]
Laser Aided Manufacturing Process (LAMP)	Dept. of Mech. & Aerospace Eng., Univ. of Missouri, Rolla (USA)	[109, 110, 111, 112]
Laser Based Additive Manufacturing (LBAM)	Res. Center f. Adv. Manufacturing, Southern Meth. Univ., Richardson (USA)	[113, 114, 115, 116, 117]
Direct Laser Deposition (DLD)	Institute of Science & Technology, University of Manchester (GB)	[118, 119, 120, 121, 122, 123]
Laser Aided Powder Solidification – Powder Jet (LAPS-J)	Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart	[130, 131, 132, 133]

Tabelle 2.2: Übersicht zu den Ansätzen internationaler Entwicklungen zum Lasergenerieren.

Ein Hauptbestandteil der Anlage ist ein Pulverbeschichtungskopf mit integrierter In-Prozess-Spurbreitenvariation, der Beschichtungsbreiten von 2 bis 5 mm ermöglicht [41].

Am Laser Zentrum Hannover beschäftigt man sich seit 1994 mit dem **3D-Laserstrahl-Pulver-Auftragschweißen** [42, 43]. Eingesetzt werden sowohl CO₂- als auch Nd:YAG-Laser, Zusatzwerkstoff wird in Pulverform koaxial zum Laserstrahl zugeführt [44]. Damit wurde die Möglichkeit der Prozessüberwachung durch Schmelzbad-Temperaturmessung mit einem Pyrometer erprobt [45] und ein mathematisches Modell zur Abschätzung der Prozessparameter erstellt [46, 47].

Erste Anwendungen des Laserbeschichtens für Rapid Prototyping von der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule und vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen wurden 1995 veröffentlicht [48]. Eingesetzt werden ausschließlich CO₂-Laser und zunächst unidirektionale, später auch koaxiale Zufuhr von Pulver [15]. Ein Schwerpunkt der Arbeiten stellt die Prozessregelung zur Erzielung eines gleichmäßigen Spurauftrags dar [49]. Zielrichtung neuerer Arbeiten ist neben dem Rapid Prototyping hauptsächlich das Reparaturbeschichten metallischer Bauteile [50].

Bei dem an der Carnegie Mellon University, Pittsburgh (USA) in Zusammenarbeit mit der Stanford University, Stanford (USA), entwickelten Verfahren namens **Shape Deposition Manufacturing** (SDM) werden verschiedenste Technologien in getrennten Stationen zur Verfügung gestellt [51, 52]. Mit Hilfe eines Palettensystems können die Werkstücke von einem Roboter wechselweise den verschiedenen Stationen zu einzelnen Bearbeitungsschritten zugeführt werden. In den Stationen stehen zum einen materialauftragende Prozesse wie Flamm- oder Plasmaspritzen, Wachs- oder Kunststoffaufbringung sowie konventionelles MIG-Auftragsschweißen zur Verfügung. Zum anderen existiert eine Station zur 5-achsigen CNC-Fräsbearbeitung sowie eine weitere zum Kugelstrahlen für den zwischenzeitlichen Abbau von Eigenspannungen in den entstehenden Bauteilen. Seit 1996 verfügt die Anlage auch über die Möglichkeit des Lasergenerierens; eingesetzt werden Nickel- und Eisenbasislegierungen [53]. Damit lassen sich Bauteile unter Verwendung von Stützstrukturen sowie Werkstücke aus verschiedenen metallischen Materialien in Kombination oder aus nichtmetallischen oder keramischen Werkstoffen fertigen [54, 55, 56].

Unter der Bezeichnung **Laser-Aided Direct Rapid Prototyping** (LADRP) wird das Lasergenerieren an der University of Central Florida, Orlando (USA) seit 1995 entwickelt [59]. Neben werkstoffwissenschaftlichen Untersuchungen [60] bildet die Datenaufbereitung aus CAD-Modellen einen Arbeitsschwerpunkt [61].

Die Erfahrung auf dem Gebiet des Laserbeschichtens an der schweizerischen Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) fließt seit 1996 in einen **Laser Metal Forming** (LMF) genannten Prozess [16]. Schwerpunkt der Arbeiten mit unidirektionaler Pulver- und Drahtzufuhr ist neben der Prozesscharakterisierung die Erzeugung hochtemperaturfester einkristalliner Volumen aus Nickelbasislegierungen [62, 63]. Eine Anwendung dieses Prozesses findet sich im Reparaturbeschichten von Turbinenschaufeln, die im Rahmen des schweizerischen Schwerpunktprogramms Werkstoffforschung in einem Verbund der Firmen *Sulzer Innotec*, *ABB Kraftwerke AG*, *Swissair*, *Calcom* sowie der Eidgenössischen Materialprüfungs- und

Forschungsanstalt (EMPA) und der EPFL durchgeführt wurde [64, 65]. Inzwischen ist das Reparaturbeschichten von Turbinenschaufeln ein etablierter Fertigungsprozess bei *Sulzer Elbar* in Lomm (NL) [66, 67].

Auch am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden liegen Arbeiten und Entwicklungen zum **3D-Laser-Auftragschweißen** mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern vor [68, 69]. Als Zusatzwerkstoff wird Pulver dem Schmelzbad über eine Ringstrahldüse [70] oder über ein modulares System aus mehreren Einzeldüse [71] koaxial zugeführt. Inzwischen wurde ein laserintegriertes System für additive und spanende Bearbeitung aufgebaut [72].

Eines Nd:YAG-Lasers und einer patentierter koaxialer Pulverzufuhr [73] bedient sich die Forschungsgruppe vom Los Alamos National Laboratory (USA) in ihrem ebenfalls patentgeschütztem [74] **Directed Light Fabrication** (DLF) genannten Prozess seit 1996 [75]. Mit Hilfe einer in fünf Achsen beweglichen Anlage können auch komplexere Geometrien generiert werden [76, 77, 78].

Seit 1998 wird im National Research Council, Ontario (Kanada) eine Variante des Lasergenerierens unter dem Namen **Free-Form Laser Consolidation** entwickelt. Die aus dieser Gruppe veröffentlichten Arbeiten befassen sich in erster Linie mit der Untersuchung der metallurgischen und mechanischen Eigenschaften sowie der Korrosionsbeständigkeit von verschiedenen lasergenerierten Materialien [79, 80].

Einen leicht veränderte Verfahrensvariante verfolgt eine Gruppe an der Pennsylvania State University und der Johns Hopkins University in Laurel (USA): In einer mit Argon gefluteten Prozesskammer wird simultan zugeführtes Pulver mit Hilfe eines 14-kW-CO₂-Lasers aufgeschweißt [81]. Ziel dieses **LaserCast** (oder auch **Lasform** [84]) genannten Prozesses ist es, großvolumige Bauteile aus Titan-Aluminium-Legierungen und Nickel-Aluminium-Bronzen für Anwendungen der Luftfahrtindustrie herzustellen [82, 83]. Der Prozess wurde in Zusammenarbeit mit der Firma *MTS Systems Corporation* (frühere Verfahrensbezeichnung: **Laser Metal Deposition** (LMD) [85]) und ihrer Tochterfirma *AeroMet Corporation* [86], beide Eden Prairie (USA), entwickelt und wird von diesen als Dienstleistung angeboten.

Ebenfalls in einer Argon-Schutzatmosphäre findet der Prozess namens **Laser Engineered Net Shaping** (LENS) an den Sandia National Laboratories, Albuquerque (USA), statt [87]. Entwickelt wurde diese Prozessvariante seit 1995 in Zusammenarbeit mit *United Technologies Pratt & Whitney*, die ursprünglich vorgesehene Anwendung bestand in der Herstellung kleiner Stückzahlen hochspezialisierter Atomwaffenkomponenten [88]. Die Forschungsarbeiten beschäftigten sich insbesondere mit der Temperaturverteilung innerhalb von Bauteilen während des Generierens [89, 90, 91] und der Optimierung der Gefügestruktur [92, 93]. Ab 1997 erfuhr der LENS-Prozess durch einen Verbund aus zehn Industrieunternehmen großen Vorschub [94, 95]. Beteiligt waren neben der oben genannten *MTS Systems Corporation* auch die Firma *Optomec Design Corporation*, Albuquerque (USA), die inzwischen sowohl Dienstleistungen [96, 97, 98] als auch kommerzielle Anlagen für den LENS-Prozess anbietet [99, 100]. Für die Untersuchungen zum LENS-Prozess aus anderen Forschungseinrichtungen wurden entweder jeweils eigene Anlagen beschafft, wie zum Beispiel an der Ohio State University in Columbus (USA) [101] oder an der Lehigh University, Lehigh (USA) [102], oder es wurde auf Anlagen in der Firma *Optomec* gearbeitet wie zum Beispiel in [103].

Seit 1999 wird an den Sandia National Laboratories auch der **Wirefeed Process** entwickelt, bei dem drahtförmiger Zusatzwerkstoff eingesetzt wird. Im Gegensatz zu pulverförmigem Zusatzwerkstoff kann das eingebrachte Material zu 100 % genutzt werden [104].

Bandförmiger Zusatzwerkstoff wird in dem von der Firma *H&R Technology Inc.*, Lowell (USA), entwickelten und **Precision Metal Deposition** (PMD) genannten Prozess mit einem Laserstrahl aufgebracht. Als Vorteil gegenüber pulverförmigem Werkstoff wird eine geringere Wärmebelastung des Bauteils genannt [105]. Zum Einsatz kommt diese Technologie vor allem beim Reparaturbeschichten von Turbinenbauteilen [106].

An der University of Birmingham existiert ein Prozess namens **Direct Light Fabrication** [107], der Schwerpunkt der Veröffentlichungen stellen Gefügeuntersuchungen von Titan-Legierungen dar (zum Beispiel [108]).

An der University of Missouri in Rolla (USA) wurde, basierend auf den Erkenntnissen des DMD-Verfahrens, ein System aus einer fünfschichtige Fräsmaschine, einem Pulverförderer und einer Nd:YAG-Bearbeitungsoptik mit koaxialer Pulverzufuhr für abwechselnd additive und subtraktive Bearbeitung aufgebaut [109, 110]. Die Schmelzbadtemperatur wird mittels eines Zweifarben-Pyrometers, die Schichtdicke mittels Triangulationssensor gemessen. Zusätzlich erfolgt eine koaxiale Aufnahme des Schmelzbads mittels CMOS-Kamera. Ein Schwerpunkt der Arbeiten an diesem **Laser Aided Manufacturing Process** (LAMP) genannten Verfahren liegt in der Entwicklung einer erweiterten Regelungstechnik, die auf einem systemtheoretischen dynamischen Prozessmodell basiert. Weiterhin wird an einem System zur Planung des Bearbeitungsprozesses gearbeitet, das von CAD-Daten komplexer Bauteile ausgeht [111, 112].

Arbeiten zu Sensorik und Modellierung des Prozesses werden auch an der Southern Methodist University in Richardson (USA) durchgeführt. Grundlage sind Untersuchungen zu Sensorik beim CO₂-Laserschweißen, die 1998 begonnen wurden. Erste Veröffentlichungen zum Lasergenerieren stammen aus dem Jahre 2000 [113]. Die Schwerpunkte liegen auf Modellierungen [116], der Entwicklung einer Infrarotsensorik [114] sowie eines Pulverförderers [117]. Für das zuvor als **3D Laser Cladding** bezeichnete Verfahren hat sich ab 2002 die Bezeichnung **Laser Based Additive Manufacturing** (LBAM) etabliert [115].

Ab 2002 liegt eine Vielzahl von Veröffentlichungen aus dem Institut of Science and Technology der Universität Manchester vor. Im Rahmen des **Direct Laser Deposition** (DLD) genannten Verfahrens [118] wird der Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter beim Einsatz eines gepulsten CO₂-Lasers [119] und eines Diodenlasers [120] auf das Prozessergebnis dargestellt. Ein weiterer Schwerpunkt ist der Vergleich von wasser- und gasverdünntem Zusatzwerkstoff [121, 122] und der Einfluss unterschiedlicher Parameter koaxialer Pulverzufuhr auf das Bearbeitungsergebnis [123].

Für das mehrlagige Laserbeschichten – zum Beispiel für den Bau und die Reparatur von Kunststoffverarbeitungsmaschinen – wurde 1995 am Institut für technische Physik des DLR in Stuttgart der Begriff **Laserstereoschichtung** geprägt [124].

Weitere Arbeiten zum Lasergenerieren, die aus Erfahrungen zum Laserbeschichten stammen [125, 126], sind von der Firma *Laser X Corporation Ltd.*, Aichi-ken (Japan) [127, 128] bekannt; ebenso vom Gintic Institute of Manufacturing Technology (Singapur) [129].

Am Institut für Strahlwerkzeuge in Stuttgart schließlich beschäftigt man sich seit 1994 mit dem Lasergenerieren für das Rapid Prototyping [130]. Im Rahmen eines Sonderforschungsbereiches der Universität Stuttgart [131] wird das Lasergenerieren seit dem unter der Bezeichnung **Laser Aided Powder Solidification – Powder Jet** (LAPS-J) in konventionelle Werkzeugmaschinen integriert [132, 133]. Damit zusammenhängende Untersuchungen bilden die Basis der vorliegenden Arbeit.

2.2.4 Zusatzwerkstoffe

Das Lasergenerieren eignet sich für eine sehr breite Palette von einsetzbaren Zusatzwerkstoffen. Neben reinem **Eisen** [16], reinem **Aluminium** [18] oder niedrigschmelzenden Bronze-Legierungen auf **Kupfer-Basis** [35, 76, 83, 102, 129] werden auch die beim Laserbeschichten häufig eingesetzten Stellite auf Kobalt-Basis verwendet. Dank ihres Anteils an Kohlenstoff und Karbidbildnern wie Wolfram und Molybdän verfügen sie über eine große Härte und sind auch bei hohen Temperaturen sehr korrosions- und verschleißbeständig. Neben **Stellit 6** [16, 25, 43, 44, 45, 80, 125, 127, 128] wird auch **Stellit 21** [19, 35] mit niedrigem und **Stellit F** [16] mit hohem und zähigkeitssteigerndem Nickelgehalt verwendet. Diese relativ teuren und spanend nur sehr schwer nachzubearbeitenden Legierungen finden ihren Einsatz hauptsächlich in korrosiven Atmosphären und bei hohen Temperaturen, zum Beispiel bei Gasturbinen oder Komponenten der chemischen Industrie oder der Atomindustrie [134].

Verwendung finden weiterhin hochtemperaturbeständige **Nickel-Basislegierungen** [60, 62, 124, 129], insbesondere **Inconel 625** [16, 44, 45, 79, 92], **Inconel 690** [78] und **Inconel 738** [66, 67]. Diese sehr zähen und zu Kaltverfestigung neigenden Werkstoffe sind spanend ebenfalls nur schwer nachzubearbeiten. Einsatzfelder hierfür sind insbesondere Turbinenschaufeln in Gas- und Dampfturbinen oder andere Komponenten, die dauerhaft hohen Temperaturen ausgesetzt sind.

Dank des von allen Legierungen besten Verhältnisses von Festigkeit zu Gewicht zielen die Anwendungen der **Titan-Legierung** Ti-6Al-4V hauptsächlich in die Luft- und Raumfahrttechnik [82, 101, 108, 103]. Ähnlich wie Stahl lässt dieser besonders korrosionsbeständige Werkstoff durch den Übergang von Titan aus der Alpha- in die Beta-Phase bei ca. 880 °C eine gewisse Wärmebehandlung zu. Er tendiert bei der Verarbeitung unter hohen Temperaturen allerdings zur Bildung spröder Gefügebestandteile wie Oxide, Nitride, Carbide oder Hydride und muss deshalb insbesondere beim Lasergenerieren unter sehr gut überwachter inerter Schutzgasatmosphäre, wie sie die Prozessvarianten LaserCast und LENS bieten, verarbeitet werden.

Chrom-Nickel-Stähle wie zum Beispiel die Legierungen 304 [16, 25, 60], 314 [22] oder die aufgrund des Molybdän-Anteils säurebeständigere Sorte 316L (X2CrNiMo17132) [25, 53, 68, 76, 79, 92, 119, 120, 121, 122] werden als Zusatzwerkstoffe für den Werkzeugbau, zum

Beispiel für Druckgussformen und -formeinsätze, verwendet. Durch ihre umwandlungsfreie Gefügeausbildung eignen sich diese Legierungen besonders gut für das Lasergenerieren. Sie weisen allerdings auch eine relativ hohe Wärmeausdehnung auf, die zu Heißrissen führen kann. Bei der spanenden Nachbearbeitung neigen diese Werkstoffe aufgrund ihres hohen Anteils an Chrom zum Anhaften an den Werkzeugen; HSC-Bearbeitung wird deshalb empfohlen [134]. In [76] wird zudem von der Verwendung des mit 12 % Chrom legierten Stahls 410 berichtet. Ebenfalls geeignet für das Lasergenerieren scheint der Warmarbeitsstahl H13 zu sein, der aufgrund seines Anteils an Vanadin sehr feinkörniges Gefüge ausbildet und damit eine hohe Zähigkeit aufweist. Das Gefüge lasergenerierter und anschließend wärmebehandelter Bauteile weist sogar eine homogenere Struktur auf als geschmiedete Teile dieses Materials [27, 93]. Interessant ist dieser Stahl für Gussformen, Werkzeuge zur Bearbeitung von Nichteisenmetallen oder für Verbindungsteile in der Luftfahrt- und Automobilindustrie.

Als Zusatzwerkstoffe untersucht werden weiterhin die **Schnellarbeitsstähle** M2 [68] und M4 [79], die durch ihre karbidbildenden Legierungsbestandteile Wolfram, Molybdän und Vanadin sehr hartes und sprödes Gefüge ausbilden. Sie gelten als schwer schweißbar und müssen nach dem Lasergenerieren einer spannungsabbauenden Wärmebehandlung unterzogen werden. Die Einsatzfelder dieser Stähle zielen auf stark verschleißbeanspruchte Teile wie Preßstempel, Matrizen oder Schneidwerkzeuge.

Als besonderen Vorteil gegenüber anderen Fertigungsverfahren bietet das Lasergenerieren die Möglichkeit, **mehrerer Materialien oder Legierungen** in einem Bauteil zu kombinieren. Solche Ansätze werden in [54, 60, 92, 98, 102, 103] untersucht.

2.2.5 Ähnliche Verfahren

Neben dem Generieren mit Laserstrahlung existieren ähnliche Ansätze mit der Zielrichtung des Rapid Prototypings, bei denen andere Wärmequellen verwendet werden. In dem in [135] beschriebenen Prozess namens **Electron Beam Solid Freeform Fabrication** wird drahtförmiger Zusatzwerkstoff in das von einem Elektronenstrahl erzeugte Schmelzbad eingebracht. Auch konventionelle **MIG-Schweißtechnologie** wird zur schichtweisen Erzeugung metallischer Volumina untersucht [136]; als Handhabungssystem kommen Roboter [137, 138] oder dreiachsige CNC-Maschinen mit der Möglichkeit einer spanenden Nachbearbeitung der Bauteile zum Einsatz [139].

2.3 Parametereinflüsse auf den Spurquerschnitt

Der Spurquerschnitt ist charakterisiert durch die **Spurhöhe** h_S und die **Spurbreite** b_S . Beide Größen sind durch einzelne Prozessparameter gezielt beeinflussbar, jedoch nicht völlig unabhängig voneinander. Die Grenzen werden durch den schmelzflüssigen Zustand gesteckt, in

dem die Viskosität und die Oberflächenspannung des flüssigen Metalls das maximale **Formverhältnis**

$$\zeta = \frac{b_S}{h_S} \quad (2.1)$$

bestimmen. Die in den Untersuchungen zu dieser Arbeit erzielten Formverhältnisse liegen in einem Bereich $0,2 \leq \zeta \leq 6$.

Der Spurquerschnitt wird bei festgelegtem Grund- und Zusatzwerkstoff sowie einer festgelegten Anlagenkonfiguration in erster Linie durch vier frei wählbare Prozessparameter bestimmt, die hier als **primäre Parameter** bezeichnet werden sollen:

- Der **aufgeschmolzene Pulvermassenstrom** des zugeführten Werkstoffs \dot{m}_P ;
- die **Vorschubgeschwindigkeit** v , mit der der Laserstrahl sich relativ zum Werkstück bewegt;
- der **Laserstrahldurchmesser** d_L in der Wechselwirkungszone und
- die **Laserleistung** P_L .

Werden die anderen Parameter jeweils konstant gehalten, dann gelten prinzipiell folgende Zusammenhänge:

- Die Spurrhöhe h_S wächst mit steigendem Pulvermassenstrom \dot{m}_L , sinkender Vorschubgeschwindigkeit v oder geringerer Laserleistung P_L (geringere Schmelzbadtemperatur);
- die Spurbreite b_S wächst mit zunehmendem Laserstrahldurchmesser d_L oder mit zunehmender Laserleistung P_L (höhere Schmelzbadtemperatur).

Die in der Literatur dokumentierten Auswirkungen dieser und weiterer Verfahrensparameter auf den Spurquerschnitt sollen im Folgenden zusammengefasst werden.

2.3.1 Laserstrahlung

2.3.1.1 Strahlquerschnitt

Wie bei allen Verfahren der Lasermaterialbearbeitung lässt sich durch Größe und Form der vom Laserstrahl beleuchteten Fläche F_L auf dem Werkstück die Ausprägung der Wechselwirkungszone und deren Temperaturverteilung bestimmen. Für das Lasergenerieren ist die Strahlform insbesondere deshalb eine der wesentlichen Führungsgrößen für den gesamten Prozess, weil die Abmessungen der Auftrefffläche des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche vor allen anderen Parametern den **Durchmesser des Schmelzbads** und damit die Breite der aufgetragenen Spuren bestimmt. Um ein von der Bearbeitungsrichtung unabhängiges Ergebnis zu erzielen, wird in der Regel mit rundem Strahlquerschnitt gearbeitet. Damit gilt

$$F_L = \frac{\pi \cdot d_L^2}{4} \quad (2.2)$$

mit dem Strahldurchmesser d_L auf dem Werkstück. Eine detaillierte Betrachtung von Abweichungen des Strahlquerschnitts von der Kreisform und ihre unmittelbare Auswirkung auf das Bearbeitungsergebnis beim Lasergenerieren mit CO₂-Strahlung findet sich in [15].

In Untersuchungen mit Ni- und Cu-Basislegierungen wurde festgestellt, dass ein kleiner Laserstrahldurchmesser auf dem Werkstück gegenüber einem großen wesentliche Vorteile beim Lasergenerieren bietet. Zwar ist die Volumenauftragsleistung geringer, aber auch die Wärmebringung in das Werkstück und damit dessen Verzug verringert sich deutlich, so dass eine höhere geometrische Genauigkeit erzielt wird. Dazu trägt ebenfalls eine – im Vergleich zu großem Laserstrahldurchmesser und damit großem Spurquerschnitt – feinere Stufung der Spurstapel bei. Aus metallurgischer Sicht konnten zudem mit kleineren Strahldurchmessern vergleichsweise weniger Poren im erzeugten Gefüge ausgemacht werden [129].

2.3.1.2 Leistungsdichte

Als Leistungsdichte I wird die auf die vom Laserstrahl beleuchtete Fläche bezogene Laserleistung bezeichnet:

$$I = P_L / F_L \quad . \quad (2.3)$$

Die Größenordnung der notwendigen Leistungsdichte für das Laserbeschichten und das Lasergenerieren wird in Arbeiten mit CO₂-Laserstrahlung üblicherweise mit 10⁴ W/cm² angegeben [12, 15, 140, 141]. Der Wert der **optimalen Leistungsdichte** wird jedoch von der Schmelztemperatur des Substratmaterials und des verwendeten pulverförmigen Werkstoffs, der Bauteiltemperatur, der Art des Schutzgases sowie der eingesetzten Laserwellenlänge bestimmt.

Die in [89] veröffentlichten theoretischen Untersuchungen zur Temperaturverteilung in einem lasergenerierten Spurstapel kommen zu dem Ergebnis, dass die Wärmeabfuhr aus dem Schmelzbad auf schmalen oder kurzen Stegen signifikant behindert ist. Um den Spurquerschnitt dennoch beibehalten zu können, wird empfohlen, in diesen Fällen die Laserleistung geringfügig zurückzunehmen oder die Vorschubgeschwindigkeit zu erhöhen. Weiterhin wird festgestellt, dass sich Eigenspannungen durch Vorwärmung des Substrats bzw. des Bauteils bis zu 400 °C wirksam vermindern lassen, ohne dass die Prozessparameter gegenüber dem Fall ohne Vorwärmung wesentlich angepasst werden müssen.

Messungen ergaben eine anfänglich um ca. 200 °C erhöhte Schmelzbadtemperatur, die sich im Verlauf der ersten 10 bis 15 Schichten auf die Schmelztemperatur des Pulverwerkstoffs einpendelte (zum Beispiel von 1700 °C auf 1520 °C bei Eisenbasispulver). Ein solcher charakteristischer Temperaturrückgang wurde bei verschiedenen untersuchten Materialien beobachtet [16]. Auch höhere Schmelzbadtemperaturen bis 1800 °C wurden gemessen [49].

2.3.1.3 Leistungsdichteverteilung

In [142] wird untersucht, wie die Leistungsdichteverteilung („Intensitätsprofil“) auf dem Weg durch den Strom von Pulver und Gas der Zusatzwerkstoffzufuhr beeinflusst wird. Streuung an

Pulverpartikeln wird dabei nicht berücksichtigt. Ausgehend von einer konstanten Leistungsdichte, einem „**Top-hat**“-Profil, resultiert aus den Modellierungen, dass das einfallende Profil durch einen einseitig eintretenden Pulverstrahl auf zwei verschiedene Weisen beeinflusst wird: Zum einen erfährt es eine **lineare Dämpfung**, was vom erwarteten exponentiellen Zusammenhang im BEERSchen Gesetz abweicht. Zusätzlich erfährt das Profil der Leistungsdichte eine **Verkipfung**, wie sie in **Bild 2.3** qualitativ skizziert ist. Damit trifft auf der der Pulverdüse zugewandten Seite des Laserstrahls die niedrigste Leistungsdichte auf das Werkstück, welche praktisch linear über den Laserstrahl anwächst und schließlich auf der der Pulverdüse abgewandten Seite den höchsten Wert annimmt. Daraus werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Mit abnehmendem Pulverdüsenswinkel α_P steigt der Dichtegradient des Pulverstroms, den der Laserstrahl durchdringen muss, was einen größeren Verkipfungswinkel des Leistungsdichteprofiles bedingt. Um den Verkipfungswinkel des Leistungsdichteprofiles zu minimieren, sollte ein möglichst großer Pulverdüsenswinkel (α_P angestrebt werden).
- Für den Beschichtungsprozess mit schleppender Pulverzufuhr (Pulverdüse in Vorschubrichtung vor dem Laserstrahl) ist die Verkipfung des Leistungsdichteprofiles durchaus nützlich für den Bearbeitungsprozess: Auf der Seite der Pulverdüse, in Vorschubrichtung vorne, wird das Grundmaterial mit einer geringeren Leistungsdichte beaufschlagt als die aufgebaute Spur auf der auslaufenden Seite gegenüber der Pulverdüse. Dadurch kann erklärt werden, warum beim Laserbeschichten und -generieren eine relativ geringe Einschmelztiefe erzielbar ist.

Der positive homogenisierende Effekt des von der Lichtleitung in Glasfasern herrührenden konstanten Leistungsdichteprofiles wird in [120] insbesondere für die Generierung schmaler Spuren bescheinigt.

Der Vergleich des Einflusses von Gradientenindexfaser (gaußförmiges Leistungsdichteprofil) und Stufenindexfasern („Top-hat“-Leistungsdichteprofil) auf die durch Generieren erzeugte

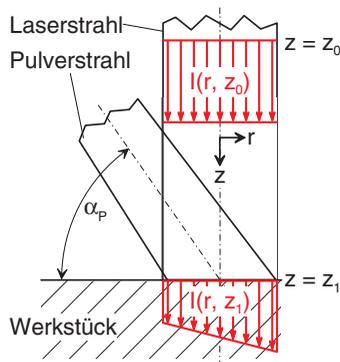


Bild 2.3: Qualitative Darstellung der Verkipfung eines „Top-hat“-Profils der Leistungsdichteverteilung nach dem Durchtritt durch den einseitig zugeführten Pulverstrahl [142].

Spurgeometrie zeigt, dass die Form der Spurquerschnittsfläche dem Verlauf des Brechungsindex in der Faser folgt: Bei gleicher Größe der Querschnittsfläche sind die mit einem „Top-hat“-Profil generierten Spuren breiter und flacher als solche, die mit einem gaußförmigen Profil erzeugt wurden [143]. Ähnliche für schmale Strukturen positive Ergebnisse werden beim Einsatz von fasergekoppelten Diodenlasern beobachtet [120].

2.3.2 Zusatzwerkstoff

Die wesentlichen Vorteile des einstufigen Laserbeschichtens mit **pulverförmigem Zusatzwerkstoff** gegenüber kontinuierlicher Draht-, Stab- oder Folienzufuhr bzw. zweistufigen Verfahren werden in [140] wie folgt beschrieben:

- Ein Arbeitsgang;
- effektive Werkstoffenergieerwärmung wegen des großen Verhältnisses von Oberfläche zu Masse der Pulverpartikel;
- breites Werkstoffsortiment durch kommerziell verfügbare Pulvermischungen;
- flexibel bei formkomplizierten Oberflächen;
- große Schichtdicken durch Spurüberlagerung möglich;
- gut automatisierbar;
- optimales energetisches Prinzip infolge gleichzeitigen kontinuierlichen Schichtaufbaus und Erzeugung eines Temperaturfelds durch Wärmeleitung (Pulver : Paste : Spritzschicht = 1 : 2 : 6);
- Werkstoffzufuhr im Laserstrahl möglich.

Im Hinblick auf einen automatisierten und flexiblen Prozess erlangen diese Vorteile für das Lasergenerieren eine besondere Bedeutung. Die ebenfalls in [140] genannten Nachteile wie die unvollkommene Pulverausnutzung lassen sich im Prototypenbereich und bei Verwendung gängiger Werkstoffe auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten meist in Kauf nehmen.

Einem weiteren genannten Nachteil, der Störeinfluss des Spülgases bei transmittierenden CO₂-Universaloptiken, lässt sich durch besonderes Design der Bearbeitungsoptik (vgl. Kapitel 4.5) bzw. durch Einsatz von Nd:YAG- oder Diodenlasern (vgl. Kapitel 4.4) wirksam begegnen.

Auf die empfindliche Abhängigkeit des Ergebnisses von der **Konstanz der Pulverförderung** schließlich gilt es, besonderes Augenmerk zu richten. Um bei gleichen Prozessparametern stets einen reproduzierbaren Spurquerschnitt zu erhalten, ist eine geeignete Fördereinrichtung unabdingbar (vgl. Kapitel 2.4.2 und Kapitel 4.6). Üblich ist weiterhin eine Aufbereitung des Zusatzwerkstoffs durch Ausheizen, um hygroskopisch gebundenes Wasser zu eliminieren und die Rieselfähigkeit zu erhöhen [25] (vgl. Kapitel 3.2.5).

2.3.2.1 Eigenschaften und Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffs

Neben den oben genannten Prozessparametern bestimmen auch die physikalischen Eigenschaften des Zusatzwerkstoffs den entstehenden Spurquerschnitt. So beeinflussen **Viskosität**

und **Oberflächenspannung** des schmelzflüssigen Werkstoffs Form und Qualität des Bearbeitungsergebnisses: Hohe Fließfähigkeit führt zu glatteren Spuroberflächen, hohe Oberflächenspannung zu größeren Formverhältnissen ζ . Dünnerflüssigere Schmelze tendiert dazu, seitlich an bereits generierten Volumina herunterzulaufen. Dadurch wird die Rauigkeit der seitlichen Fläche reduziert, die Reproduzierbarkeit der geometrischen Form allerdings nimmt durch die frei erstarrende Schmelze ab. Nach [140] lässt sich die Viskosität der Schmelze durch die Legierungsbestandteile Bor und Silizium mit Gewichtsanteilen bis zu 4 % vermindern. Der Effekt beruht auf der Bildung von Borsilikaten oberhalb von 900 °C.

2.3.2.2 Partikeldurchmesser

Die Partikelgröße des eingesetzten Pulverwerkstoffs hat großen Einfluss auf Prozessführung und Bearbeitungsergebnis. Bereits in [140] wird darauf hingewiesen, dass Pulverpartikel mit einer Ausdehnung kleiner 30 μm den gleichmäßigen Strom des Zusatzwerkstoffs durch statische Aufladung und daraus folgender **Verklumpung** behindern können. Aus dem plötzlichen Lösen solcher Pulveransammlungen innerhalb der Zuführung kann es zu Schwankungen der Werkstoffdosierung kommen, die sich unmittelbar in ungleichmäßigen Spurquerschnitten auf dem Werkstück niederschlagen. Zwar ist nach [141] die Erwärmungsgeschwindigkeit eines Partikels im Laserstrahl um so höher, je kleiner der Partikeldurchmesser und damit das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche ist, weshalb kleine Partikelgrößen vorteilhaft erscheinen. Eine sichere Prozessführung kann jedoch auch mit größeren Partikeln erzielt werden, so dass die Notwendigkeit der (Vor-)Erwärmung der Pulverpartikel auf ihrem Weg durch den Laserstrahl für einen stabilen Prozess nicht gegeben scheint (siehe hierzu auch Kapitel 3.3.1). Üblich ist eine **gezielte Fraktionierung** der eingesetzten Pulverpartikel in einem Größenbereich von 20 bis 150 μm .

Nicht zu unterschätzen ist auch die von pulverförmigen Zusatzwerkstoffen ausgehende **Gesundheitsgefährdung** durch Einatmen von in der Luft schwebenden, lungengängigen Partikeln. Unter diesem Gesichtspunkt ist eine maximale Untergrenze der Partikelgrößen anzustreben; eine **wirksame Absaugung** während des Bearbeitungsprozesses mit entsprechender Filterung der abgesaugten Luft ist unbedingt notwendig.

2.3.2.3 Partikelform

Je nach dem, ob pulverförmiger Zusatzwerkstoff durch **Wasser- oder Gasverdüsung** hergestellt wird, unterscheiden sich die Partikelformen erheblich. Während wasserverdüstete Partikel eine gleichmäßige und oftmals kugelförmige Form aufweisen, sind gasverdüstete eher unregelmäßig und zerklüftet (siehe auch Bild 3.10 auf Seite 55).

Im direkten Vergleich wurde bei wasserverdüstetem Zusatzwerkstoff 316L gegenüber gasverdüstetem eine geringere Rauigkeit der generierten Wandflächen und eine feinere Mikrostruktur des Werkstoffgefüges erzielt, es mussten dafür jedoch niedrigere Beschichtungsraten in Kauf genommen werden [121, 122].

2.3.2.4 Pulvernutzungsgrad und Pulverdüsenanordnung

Eine optimale Pulverzufuhr ist nach [12] gegeben, wenn der Pulverstrahl möglichst gleich oder nur unwesentlich größer als der Laserstrahldurchmesser auf dem Werkstück ist. Das Kriterium, das hierbei herangezogen wurde, ist der **Pulvernutzungsgrad** η_P mit

$$\eta_P = \frac{\text{eingeschmolzene Pulvermasse}}{\text{geförderte Pulvermasse}} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_P} . \quad (2.4)$$

Experimentell festgestellte Pulvernutzungsgrade hängen von Partikel- und Gasgeschwindigkeiten sowie der Größe und der Durchdringungsverhältnisse von Laser- und Pulverstrahl ab. Die Angaben für η_P in der Literatur variieren deshalb stark und liegen zwischen 8 und 85 % [24, 25].

Die **Position der Pulverauftrefffläche** relativ zu der vom Laserstrahl beleuchteten auf dem Werkstück F_L muss sehr sorgfältig eingestellt werden. Pulverstrahl und Laserstrahl sollten sich auf der Werkstückoberfläche so weit wie möglich überdecken; der größte Pulvernutzungsgrad wurde mit einem Versatz des mittleren Pulverauftreffpunkts um 1 mm entgegen der Vorschubrichtung gemessen. Bei dieser Anordnung trifft der Pulverstrahl in das Zentrum des Schmelzbads, das auf der Laserstrahlachse, durch den Materialauftrag jedoch über der Werkstückoberfläche liegt. Der Pulvernutzungsgrad zeigt große Empfindlichkeit gegenüber der horizontalen Positionierung der Pulverdüse: Bei einer Verschiebung um 200 μm verringert sich der Pulvernutzungsgrad beispielsweise um 10 %. Stabile Bedingungen wurden gefunden, wenn die durch den Materialaufbau notwendige Höhennachstellung der Pulverdüse (zumindest bei der ersten Nachstellung nach der Grundspur) geringer als der Höhenzuwachs des Werkstücks war. Dadurch wanderte der mittlere Pulverauftreffpunkt nach vorne [16, 140, 145].

In verschiedenen Untersuchungen ergab eine **schleppende Pulverdüsenanordnung** den besten Pulvernutzungsgrad η_P und die geringste Oberflächenrauigkeit. Prinzipiell ist eine richtungsunabhängige Bearbeitung aber auch bei unidirektionaler Werkstoffzufuhr möglich. Dabei ist ein **möglichst großer Pulverdüsenwinkel** (Winkel der Pulverdüsenachse zur Ebene der Werkstückoberfläche) α_P vorteilhaft, da hierdurch die Auftreffzone des Pulvers nur wenig elliptisch verzerrt ist und die unter verschiedenen Vorschubrichtungen erzielten Bearbeitungsergebnisse eher übereinstimmen. Übliche Pulverdüsenwinkel liegen zwischen 45° und 55° gegenüber der Werkstückoberfläche [12, 16, 140, 144].

2.3.3 Wechselwirkungszeit

Die Wechselwirkungszeit t_w ist die Dauer, während der ein Punkt auf dem Werkstück durch den Laserstrahl beleuchtet wird (**Einwirkungsdauer**):

$$t_w = d_L/v . \quad (2.5)$$

In [126] wird der Einfluss der Wechselwirkungszeit auf das Prozessergebnis wie folgt erläutert: Bei langen Wechselwirkungszeiten (Größenordnung 1 s) findet ein „Nachschmelzen“ des generierten Werkstoffs durch die latente Wärme im Schmelzbad statt, der mittlere Temperaturgradient zwischen Beschichtung und Substrat durch den größeren Wärmefluss durch das Schmelzbad wird geringer. Weiterhin ist die Abkühlungsrate geringer, was zu einer größeren Gefügestruktur, größeren Einschmelztiefe und geringeren Härte führt. Die erzielbaren Beschichtungsraten sind in diesem Fall jedoch hoch. Kurze Wechselwirkungszeiten führen dagegen zu hohen mittleren Temperaturgradienten, schnelle Abkühlung führt zu feinem Gefüge, relativ geringer Einschmelztiefe, größerer Härte und kleinerer Beschichtungsrate.

Mitunter wird auch die Dauer, die ein einzelnes Pulverpartikel auf seinem Weg zur Werkstückoberfläche der Laserstrahlung ausgesetzt ist, als Wechselwirkungszeit bezeichnet [141] (vgl. Kapitel 3.3.1).

2.3.4 Schutzgas

Sowohl das Schmelzbad, als auch der pulverförmige Zusatzwerkstoff mit seiner großen Oberfläche müssen wirksam vor **Oxidationsreaktionen** mit dem umgebenden Luftsauerstoff geschützt werden. Üblich ist der Einsatz von Stickstoff, Argon oder Helium. Das Schutzgas muss auf die verwendeten Werkstoffe abgestimmt werden; bei der Verarbeitung von Titan-Legierungen beispielsweise besteht mit Stickstoff die Gefahr der Bildung von ungewollten Titan-Nitriden [53]. Auch wurde früher bereits beobachtet, dass die Reproduzierbarkeit der Spurgeometrie bei Verwendung von Argon signifikant höher ist als bei Helium [146].

2.4 Systemtechnik

Auf hervorstechende Merkmale der Maschinenkonzepte, mit denen die unterschiedlichen Varianten des Lasergenerierens realisiert werden, wurde bereits im Kapitel 2.2.3 eingegangen. In diesem Kapitel wird der Stand weiterer Aspekte der relevanten Systemtechnik dargestellt.

2.4.1 Laserintegration in Werkzeugmaschinen

Bedingt durch die hohe anwendungstechnische Reife von Laserverfahren und -komponenten setzt sich der Ansatz der Integration des Werkzeugs Laser in konventionelle Werkzeugmaschinen in zunehmendem Maße durch. Auch die Idee, das Werkzeug Laser **für verschiedene Fertigungstechnologien in der selben Anlage** zu nutzen, sind inzwischen vereinzelt in kommerziellen Anlagen zu finden. Neben der bereits in Kapitel 2.2.3 genannten Anlage zum Lasergenerieren und HSC-Fräsen [39] sollen an dieser Stelle beispielhaft einige weitere kommerziell realisierte Konzepte aufgeführt werden.

Die Umsetzung der Kombination aus **Laserschweißen** und spanender Drehbearbeitung in einer Vertikaldrehmaschine in der Produktion von Magnetventilen mit großer Variantenvielfalt ist in [147] beschrieben. Die Grundlagen dafür wurden z. T. in [7] erarbeitet und fanden Eingang in ein neues Maschinenkonzept für laserintegrierte Drehzentren [148]. Die fasergeführte Integration von Festkörperlasern in Fräs- und Bohrzentren wird ausführlich in [149] behandelt. Ein Integrationsansatz mittels Spiegeloptiken für CO₂-Strahlung wird in [150] beschrieben.

Auch das **Laserabtragen**, für das die Firma *Maho AG*, Pfronten, bereits 1989 in eine eigene Anlage (*Laser cav*) mit integrierter CO₂-Laserquelle konzipiert und gebaut hat [151], wurde im Laufe der Zeit zum Oxidspanen für einen hochpräzisen Materialabtrag weiterentwickelt [152]. Inzwischen basiert diese Technologie auf einer Nd:YAG-Laserquelle und ist in eine HSC-Fräsmaschinen *Gildemeister DML 60 HSC* integriert. Damit lassen sich die Genauigkeit des Laserabtrags mit der Wirtschaftlichkeit des HSC-FräSENS in einer Aufspannung nutzen.

Drei Laserverfahren in einer Anlage wendet die Firma *Concept-Laser* an: Das **Erschmelzen von Metallpulver** im Pulverbett (*Laser Cusing*), das **Laserabtragen** für dreidimensionale Gravuren auf Freiformflächen sowie das **Laserbeschriften**. Produziert werden auf dieser Anlage Funktionsteile in Stahl wie Formeinsätze für Spritz- und Druckgusswerkzeuge sowie Prototypwerkzeuge [153].

2.4.2 Pulverförderung

Beim Laserbeschichten und -generieren schlagen sich Unregelmäßigkeiten in der Menge des zugeführten pulverförmigen Zusatzwerkstoffs direkt in Schwankungen der Spurgeometrie nieder. Bei Über- oder Unterschreiten gewisser Schwellwerte des Pulvermassenstroms droht der Laserprozess sogar instabil zu werden oder ganz abzubrechen. Die **wichtigsten Anforderungen an ein Pulverfördersystem** sind deshalb eine genau einstellbare Fördermenge sowie höchste zeitliche Konstanz des geförderten Pulverstroms in der Wechselwirkungszone.

Für die optimale Handhabung bestehen zudem weitere Anforderungen an die Anbindung an Maschinensteuerungen, Kompaktheit des Geräts, minimale Verzögerung zwischen dem Einschalten der Förderung und dem Vorhandensein eines konstanten Pulverstroms am Werkstück. Eine möglichst **geringe Austrittsgeschwindigkeit** der Pulverpartikel sowie ein minimaler Volumenstrom an Transportgas vermindert zudem einen zu hohen und damit schädlichen Impuls auf das flüssige Schmelzbad in der Wechselwirkungszone. In speziellen Fällen sollen auch besonders feine Pulver gefördert werden, die wegen statischer Aufladung oder erhöhter Hygrokopie zum Zusetzen des Förderwegs neigen.

In der Literatur werden für das Lasergenerieren verschiedenste kommerziell verfügbare oder eigenentwickelte Systeme eingesetzt, die mit **unterschiedlichen Funktionsprinzipien** versuchen, den gestellten Anforderungen zu genügen. Sehr verbreitet sind Geräte, deren Förderprinzip auf dem **Absaugen** eines definierten Pulvervolumens, das auf einem rotierenden Förderer kontinuierlich zugeführt wird, beruht [117, 154, 155].

Ebenfalls über einen rotierenden Teller dosiert der in dieser Arbeit genutzte Pulverförderer. Ein kontinuierliches Werkstoffvolumen wird über einen Abstreifer abgenommen [156, 157]; erst nach dieser **Schwerkraftförderung** wird ein definierter Transportgasstrom zugemischt [158, 159]. In Kapitel 4.6 wird dieses waageregelte System detailliert vorgestellt.

Ohne jegliches Transportgas kommt ein Gerät auf dem Prinzip der **piezo-akustischen Erzeugung von Vibrationen** aus. Auf diese Weise wird ein kontinuierlicher Pulverstrom aus einem durch einen Vorratsbehälter stets pulvergefüllten waagrechten Rohrstück gefördert. Das kompakte Gerät ist waageregelte und besticht durch das Fehlen jeglicher mechanischer Komponenten [160, 161].

Die Entwicklung eines **Schraubenförderers** wird in [9, 162] beschrieben: Eine rotierende Förderschnecke transportiert einen kontinuierlichen Pulverstrom aus einem Vorratsbehälter. Die Messung des Massenstroms erfolgt durch einen Drucksensor in der Transportgasversorgung, der den Anteil des geförderten Pulvervolumens als Reduzierung des Leitungsquerschnitts und damit als Druckerhöhung im System misst [163, 164]. Ein ähnliches Gerät ist in dem in [110] beschriebenen System zum Lasergenerieren im Einsatz.

Über die unterschiedlichen Prinzipien einer möglichst genauen Pulverdosierung hinaus liegt eine Vielzahl von Entwicklungen zur Optimierung der Pulverzufuhr in die Wechselwirkungszone vor. Dazu gehört zum Beispiel die Trennung des Transportgasstroms vom Pulverstrom kurz vor der Pulverdüse, um die Partikelgeschwindigkeit v_P und damit den Anteil ungenutzt abprallender Pulverpartikel zu senken [165]. Auch verschiedene Ausführungen der koaxialen Pulverzufuhr sind bekannt, zum Beispiel [23, 26, 71, 73, 166].

2.4.3 In-situ-Prozesskontrolle und -regelung

Eine Vielzahl von Arbeiten befasst sich mit der Aufgabe, Laserprozesse on-line, also während der Bearbeitung, zu überwachen. Im Folgenden sollen **verschiedene Ansätze** vorgestellt werden, die im Zusammenhang mit dem Laserbeschichten oder dem Lasergenerieren in der Literatur diskutiert wurden.

In [167] ist ein Ansatz veröffentlicht, den Laserbeschichtungsprozess mit Hilfe von zwei **CCD-Kameras** zu untersuchen und zu optimieren. Während eine der Kameras Informationen über die Oberflächentemperatur und die Schmelzbadgeometrie liefert, überwacht die zweite den Massenstrom des Zusatzwerkstoffs. Die Videobilder werden in Echtzeit von einem Rechner ausgewertet und eignen sich auch zur Prozessregelung.

Bereits 1987 wurde ein System zur Regelung des Laserbeschichtungsprozesses in [168] beschrieben. Bestandteil sind zum einen unterschiedliche Regelkreise: Neben der Regelung der Leistung des CO_2 -Lasers erfolgt eine Abstandsregelung auf der Basis von Signalen, die durch eine mit 10 kHz betriebene Sender-/Empfänger-Einheit für Strahlung im **nahen Infrarot-Spektrum** aufgenommen werden. Zusätzlich wurde eine Laser-Shutter-Regelung mit Hilfe von vier berührungslosen Näherungsschaltern realisiert, mit der der Laserstrahl abgeschaltet werden kann, sobald sich die Bearbeitungsoptik über die Kante des Werkstücks hinaus bewegt.

Ebenfalls geregelt wird der vom Fördersystem gelieferte Pulvermassenstrom. Zum anderen wurde ein „lernfähiges“ Regelsystem aufgebaut, das mit Hilfe von Ansätzen der Fuzzy-Logik einzelne Prozessparameter gezielt nachregelt. Eine ausführliche Darstellung ist in [164] gegeben.

Eine andere Methode zur Laserleistungsregelung wurde 1991 in [169] vorgestellt und am Beispiel des Laserbeschichtens von Kolbenstangen in [170] beschrieben. Zum Einsatz kommt hier eine **fasergekoppelte infrarot-empfindliche Fotodiode**, wobei das freie Faserende durch eine Abbildungsoptik unter einem Winkel zum Laserstrahl auf die Wechselwirkungszone gerichtet wird. Dieses Systems kommt auch beim Lasergenerieren zur Anwendung [49]. In [171] wird darüber hinaus von der Verwendung einer Thermokamera und eines Abstandssensors berichtet. Letzterer arbeitet nach dem Prinzip der Triangulation; der Messpunkt liegt in Vor-schubrichtung hinter dem Laserstrahl, so dass die bereits erstarrte Beschichtung vermessen werden kann. Streng genommen erfüllt diese Konfiguration also nicht mehr die Kriterien einer In-situ-Messung. Ebenfalls eines Triangulationssensors und eines Zweifarbenpyrometers bedient man sich zur Regelung des Generierungsprozesses in [109, 110]. Zusätzlich unterstützt wird die Signalerfassung durch eine koaxiale Aufnahme des Schmelzbads mittels CMOS-Kamera.

Ein **Sondenlasersystem**, das simultan Reflexionsgrad und Schmelzbadtemperatur misst, wird in [172] vorgestellt. Obwohl hier beim Laserbeschichten eine Korrelation des Signalverlaufs mit der Schichthöhe prinzipiell festgestellt wird, erscheint eine quantitative Auswertung der starken Schwankungen unterworfenen Signale nicht sinnvoll. Unterbrechungen der Schutzgas- oder Zusatzwerkstoffzufuhr lassen sich dagegen sehr gut in den Signalverläufen identifizieren. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass alle Einstellungen der Sensorik auf den eingesetzten Werkstoff sowie die gewählten Prozessparametern abgestimmt und die Positionen der Detektoren im Bereich von Zehntel Millimetern justiert werden müssen.

Ein **Kontur-Messsystem**, das auch schmelzflüssige Oberflächen zu vermessen vermag, wurde 1995 patentiert [32]. Es basiert auf einem oszillierenden Referenz-Laserstrahl, der die zu vermessende Kontur beleuchtet. Die Reflexionen werden mittels einer CCD-Kamera aufgenommen, wobei jedes einzelne Videobild dem zugehörigen Einstrahlwinkel des Beleuchtungsstrahls zugeordnet und mittels rechnergestützter Bildanalyse ausgewertet wird. Eine vereinfachte Variante dieses Systems wurde erfolgreich in einem Regelkreis beim Lasergenerieren (DMD-Prozess) eingesetzt, um die Höhe der generierten Spuren zu begrenzen [30]. Später wurde ein Sensor entwickelt, der auf der Basis einer hinter einer Blende angeordneten Fotodiode die Position des Schmelzbads und damit die Höhe der momentan aufgebracht Beschichtung detektiert [33].

Während des Generierens können auch die im Bauteil entstehenden Eigenspannungen gemessen werden. Basis ist eine Fixierung für die Grundplatte des entstehenden Bauteils, in die **Dehnungsmessstreifen** eingebracht sind [34].

3 Lasergenerieren variabler Spurquerschnitte

3.1 Grundlagen

Das Bearbeitungsergebnis des Lasergenerierens ist – genau wie im Falle des Laserbeschichtens – von einer Vielzahl von **Prozessparametern** wie zum Beispiel Laserleistung, Laserstrahldurchmesser auf dem Werkstück, Vorschubgeschwindigkeit, Massenstrom des Zusatzwerkstoffs sowie Position und Justage der Zufuhrdüse abhängig. Einen Überblick der prozessbestimmenden Größen gibt **Bild 3.1**. Bereits geringe Schwankungen eines oder mehrerer dieser Größen führen unweigerlich zu Unregelmäßigkeiten im Bearbeitungsergebnis. Diese setzen für gewöhnlich die gewünschte Ergebnisqualität herab, zum Beispiel in Form von ungleichmäßiger Spurgeometrie, variierender Oberflächenbeschaffenheit oder ungenügender Haftung des aufgetragenen Werkstoffs auf dem Grundmaterial oder auf bereits generiertem Materialvolumen. Zusätzlichen Einfluss üben Veränderungen der Prozessbedingungen während der Prozessdauer aus, die für voluminöse Bauteile mehrere Stunden dauern kann. Insbesondere Veränderungen der Werkstücktemperatur oder des wärmeleitenden Werkstückvolumens spielen dann eine das Bearbeitungsergebnis beeinflussende Rolle.

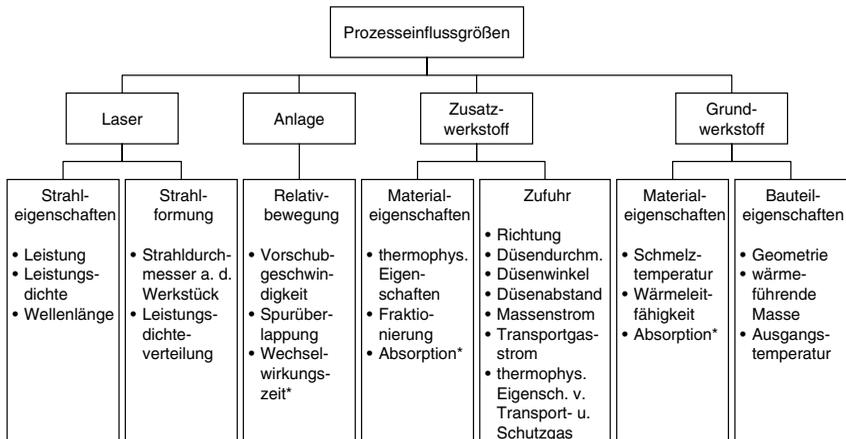


Bild 3.1: Einteilung der Prozessparameter beim Lasergenerieren (in Anlehnung an [111, 140, 168]). Eine eindeutige Zuordnung der Parameter ist nicht immer möglich, insbesondere die mit * gekennzeichneten werden maßgeblich vom Laserstrahl beeinflusst.

Die wesentliche Voraussetzung für die Variation des Spurquerschnitts während der Bearbeitung ist die **gezielte Veränderung des Strahldurchmessers** auf der Werkstückoberfläche, wie sie in **Bild 3.2** skizziert ist. Die in Kapitel 1.2 aufgezeigten Vorteile, die eine solche Variationsmöglichkeit bietet, versprechen das hohe Potenzial des Lasergenerierens als flexible Fertigungstechnologie noch weiter steigern zu können. Im Gegensatz zum technisch Machbaren gilt jedoch für eine Umsetzung über den Labormaßstab hinaus die Bedingung, dass der gerätetechnische Aufwand, der zur Realisierung notwendig ist, in **praxistauglichen Grenzen** bleibt.

Der notwendige Aufwand für eine Strahldurchmesservariation ist eng verbunden mit der Anzahl der Anlagen- und Prozessparameter, die variiert werden müssen, um auf *einer* Anlage gleichermaßen breite und schmale Spurquerschnitte in hoher Qualität reproduzierbar herstellen zu können. Den apparativen Aufwand zu minimieren heißt also, die **Anzahl der veränderlichen Parameter möglichst klein** zu halten. Es ist offensichtlich, dass unter diesen Voraussetzungen ein optimierter Prozess, der durch ideale Verhältnisse in der Wechselwirkungszone zum Beispiel hinsichtlich Pulverausnutzung, Geschwindigkeit oder Energieeinsatz charakterisiert ist, nicht erwartet werden kann. Vielmehr sind bei der Einstellung der Verfahrensparameter **Kompromisse** notwendig, so dass der Generierungsprozess zwar stabil, nicht aber mit optimaler Effektivität abläuft. Die Definition *optimaler Prozessparameter* orientiert sich in dieser Arbeit also an der Formtreue und der Materialqualität des Bearbeitungsergebnisses.

Grundlegend wird der Prozess durch die Parameter gestaltet, aus denen sich die eingebrachte Energie- und Werkstoffmenge ableiten lässt. So wird die **spezifische Energie** durch

$$E_A = \frac{P_L}{d_L \cdot v} \quad (3.1)$$

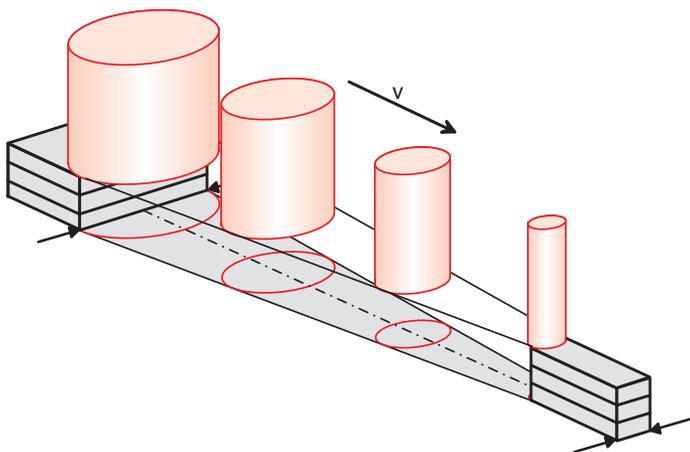


Bild 3.2: Prinzip der Erzeugung variabler Spurquerschnitte: der Laserstrahldurchmesser wird während der Bearbeitung verändert.

definiert [11]. Sie ist die pro Flächeneinheit eingebrachte Energiemenge. Analog dazu berechnet sich die pro Flächeneinheit tatsächlich aufgeschmolzene **spezifische Pulvermasse** zu

$$m_F = \frac{\dot{m}_L}{d_L \cdot v} \quad . \quad (3.2)$$

Die **wesentlichen Parameter** zur Steuerung des Generierungsprozesses sind damit

- Laserleistung P_L ,
- Laserstrahldurchmesser d_L ,
- Vorschubgeschwindigkeit v und
- aufgeschmolzener Pulvermassenstrom \dot{m}_L .

Diese gezielt zu verändern, zu jedem Zeitpunkt exakt einzuhalten, vorauszusagen oder zu kontrollieren ist die Grundlage für die Erzeugung variabler Spurquerschnitte in einem stabilen Prozess.

3.2 Spezifische Optimierung

3.2.1 Zielrichtung

Die Zielrichtung dieser Arbeit liegt darin, eine Möglichkeit aufzuzeigen, wie weitgehend soll-konturnahe Strukturen durch Lasergenerieren mit variablen Spurquerschnitten in unterschiedlichen bauteilspezifischen Werkzeugmaschinen hergestellt werden können. Diese Zielrichtung wird nun für alle weiteren detaillierteren Betrachtungen in dieser Arbeit durch die folgenden drei **Randbedingungen** konkretisiert:

1. Durch die Integration in Werkzeugmaschinen und die damit einhergehenden spezifischen (zum Beispiel spanenden) Bearbeitungsmöglichkeiten soll der Bereich der realisierbaren Spurbreiten auf relativ feine Strukturen beschränkt bleiben. Der Bereich der Strahldurchmesservariation wird deshalb auf **Spurbreiten b_S von 0,6 bis 2,4 mm** festgelegt.
2. Alle Anwendungen des Lasergenerierens für Rapid Prototyping oder Reparaturbeschichten zielen auf einen definierten Bauprozess mit gleichmäßigen Schichtdicken ab. Aus Gründen einfacherer Datenaufbereitung und Prozessführung beim schichtweisen Aufbau eines Bauteils werden deshalb – unabhängig von der Spurbreite – stets **konstante Spurbhöhen h_S** (Schichthöhen) angestrebt, die im Bereich bis zu einigen Zehntel Millimetern liegen sollen.
3. Die Möglichkeiten, die Vorschubgeschwindigkeit während der Bearbeitung zu variieren, hängen vor allem von der Leistungsfähigkeit der CNC-Steuerung des eingesetzten Handhabungssystems und von den bestehenden Eingriffsmöglichkeiten zusätzlicher Regeleinrichtungen ab. Das Ziel, das Lasergenerieren in unterschiedliche Handhabungssysteme integrieren zu können, macht es jedoch notwendig, von diesem CNC-

bzw. maschinenspezifischen Merkmal unabhängig zu bleiben. Deshalb werden im Folgenden stets Parametersätze mit einer **konstanten Vorschubgeschwindigkeit** v angestrebt. Sie muss dabei so gewählt werden, dass einerseits für alle Spurbreiten befriedigende Ergebnisse erzielt werden können, und andererseits ausreichende Beschichtungsrate erreicht werden, um auch größere Volumina in vertretbarer Zeit zu generieren.

Querschliffe einzelner unter diesen Randbedingungen erzeugter Spuren zeigt **Bild 3.3**. Es wird deutlich, dass die **geometrischen Formen** der Querschnitte **nicht ähnlich** sind. Während in der Literatur von stets ähnlichen Spurquerschnittsformen ausgegangen wird, die durch ein Kreissegment [140, 173] oder durch eine Parabel [111] angenähert werden können, gibt es bei der hier verfolgten Zielrichtung einer stets konstanten Spurbhöhe keine einfache geometrische Beschreibung, die die Querschnittsform ausreichend gut annähert. Das Formverhältnis ζ der Einzelspuren in Bild 3.3 bewegt sich deshalb im Bereich von 0,8 bis 2,6. **Bild 3.4** zeigt die Querschliffe von Stapeln mit zwei bis fünf übereinander aufgebrachtten Spuren in der selben Abstufung der Spurbreiten.

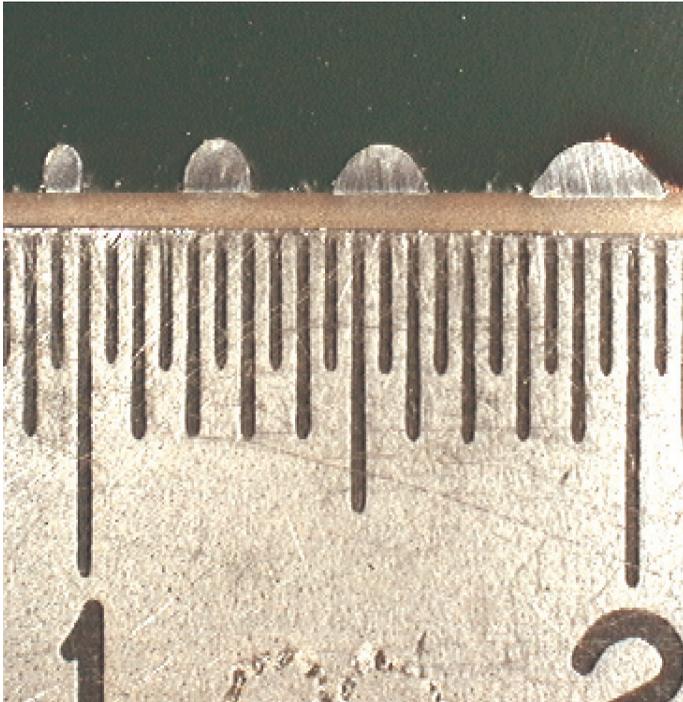


Bild 3.3: Beispiele von Einzelspuren mit unterschiedlichen Breiten und konstanter Höhe im Querschliff. Prozessparameter und Anlagenkonfiguration sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

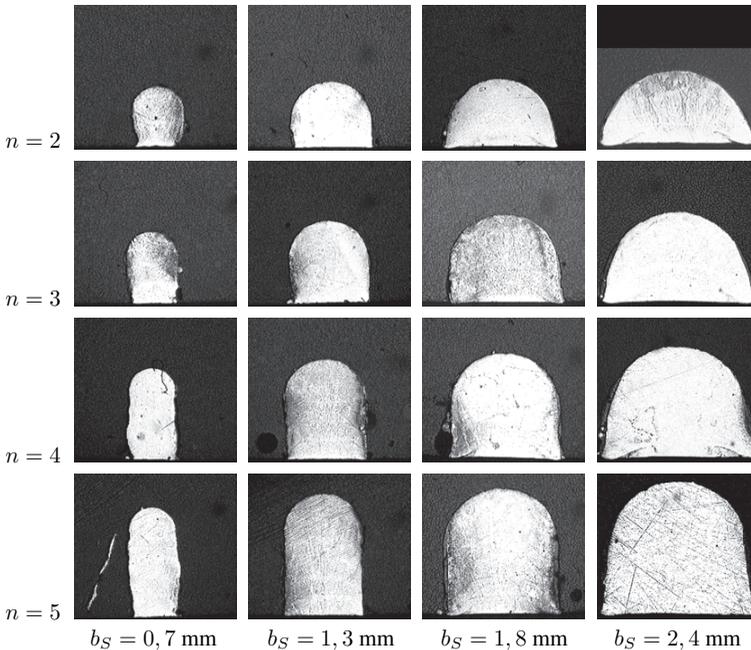


Bild 3.4: Beispiele von Spurstapeln im Querschliff. n ist die Anzahl der aufgetragenen Spuren, b_S steht für die Spurbreite. Prozessparameter und Anlagenkonfiguration sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.2.2 Konstante Parameter

Den Rahmen für die Abstimmung der in die Gleichungen (3.1) und (3.2) eingehenden primären Prozessparameter bildet die jeweils spezifische **Anlagenkonfiguration**. Durch diese „Umgebungsbedingungen“ sind weitere maßgebliche Prozessparameter festgelegt, wie zum Beispiel die Wellenlänge der eingesetzten Strahlquelle, die Art der Pulverzufuhr oder die verwendeten Werkstoffe und Gase mit ihren spezifischen Eigenschaften (siehe auch Bild 3.1).

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Anlagenkonfiguration ist in **Tabelle 3.1** aufgeführt. Damit ergibt sich die in **Bild 3.5** skizzierte **räumliche Anordnung von Laserstrahl** unterschiedlichen Durchmessers, **Pulverdüse und -strahl** sowie **Werkstück**. Gemäß den oben genannten Randbedingungen sind neben minimalem und maximalem Strahldurchmesser auch die beiden jeweils resultierenden Spurbreiten maßstäblich eingezeichnet. Von dieser Basis gehen alle weiteren Parameterbetrachtungen und -optimierungen zur Erzeugung unterschiedlicher Spurbreiten aus.

Komponente	Konstanter Parameter	Wert
Strahlquelle	Wellenlänge	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
Bearbeitungsoptik	Leistungsdichteverteilung	„top-hat“
	Fokusslage	$z_0 = 0 \text{ mm}$
Handhabungssystem	Substratmaterial	St52
	Vorschubgeschwindigkeit	$v = 600 \text{ mm/min}$
Pulverförderer	Zusatzwerkstoffart	s. Tabelle 3.2
	Pulvermassenstrom	$\dot{m}_P = 6 \text{ g/min}$ (s. Kapitel 3.2.4)
	Pulver-Fraktionierung	$50 \mu\text{m} < d_{\text{Partikel}} < 120 \mu\text{m}$
	Transportgasart	Argon
	Transportgasstrom	$\dot{V}_T = 0,5 \text{ l/min}$
Pulverdüse	Typ	unidirektional
	Winkel	$\alpha_P = 55^\circ$
	Abstand	$l_P = 12 \text{ mm}$
	Anordnung	bevorzugt schleppend
	Durchmesser	$d_P = 1 \text{ mm}$
	Schutzgasart	Argon
	Schutzgasdüse	Ringdüse, $d_i = 2 \text{ mm}$, $d_a = 6 \text{ mm}$
	Schutzgasstrom	$\dot{V}_S = 10 \text{ l/min}$

Tabelle 3.1: In den Untersuchungen zu dieser Arbeit verwendete konstante Parameter der Laboranlagen.

3.2.3 Variable Parameter und Steuerungsmöglichkeiten

Zur Gestaltung eines stabilen Prozesses sind – unter den oben genannten Randbedingungen aus den Zielrichtungen konstanter Vorschubgeschwindigkeit v und Spurbhöhe h_S sowie aus der dargestellten Anlagenkonfiguration – die drei Parameter Laserleistung P_L , Laserstrahldurchmesser d_L und geförderter Pulvermassenstrom \dot{m}_P die entscheidenden Steuergrößen.

Insbesondere die **Laserleistung** P_L muss jederzeit so angepasst sein, dass sie einerseits ausreicht, um eine gut anhaftende Spur mit geringer Oberflächenrauigkeit zu erzielen. Andererseits muss sie so gering wie möglich gewählt werden, um eine Spurbreite b_S nahe dem Laserstrahldurchmesser d_L ohne unnötige (undefinierte) Spurverbreiterung zu verursachen.

Der **Laserstrahldurchmesser** d_L lässt sich beim Einsatz von Bearbeitungsoptiken mit konstanter Brennweite durch gezielte Defokussierung verändern. Dabei ändert sich jedoch auch die Leistungsdichteverteilung über dem Strahlquerschnitt. Konstruktiv muss zudem die Aufhängung der Pulverdüse von der der Bearbeitungsoptik entkoppelt werden, damit die Düsenposition relativ zur Wechselwirkungszone konstant bleibt. Diese Nachteile werden mit einer speziellen Bearbeitungsoptik mit variablem Abbildungsmaßstab umgangen (siehe Kapitel 4.5).

Maßgeblich für einen gleichmäßigen Prozessverlauf ist eine genaue Dosierung und zeitlich

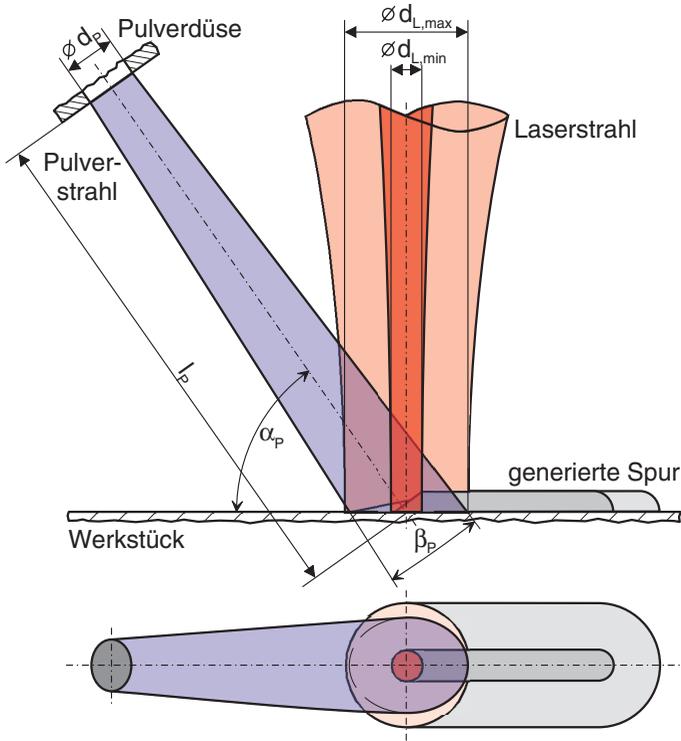


Bild 3.5: Maßstäbliche Skizze der geometrischen Verhältnisse in der Wechselwirkungszone bei minimalem und maximalem Strahldurchmesser auf dem Werkstück.

konstante Förderung des pulverförmigen **Zusatzwerkstoffs**. Auch hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn die Pulverpartikel mit möglichst geringer Geschwindigkeit v_p in die Wechselwirkungszone gelangen. Die Partikelgeschwindigkeit wirkt sich auf den Anteil abprallender und damit nicht für den Materialauftrag nutzbarer Partikel aus und wird im Wesentlichen durch den Transportgasstrom \dot{V}_T bestimmt. Der tatsächlich **aufgeschmolzene Pulvermassenstrom** \dot{m}_L hängt zudem sehr stark von Typ und Gestaltung der Pulverdüse und ihrer Abstimmung auf den Laserstrahldurchmesser ab.

Prinzipiell lassen sich alle diese Parameter zur **gezielten Steuerung** des Prozesses variieren. Zur Umsetzung einer schnellen **On-line-Prozessregelung** bieten sich einige davon in der Praxis jedoch mehr, andere dagegen weniger an. Entscheidend ist sowohl die technische Umsetzungsmöglichkeit als auch die jeweilige Zeitkonstante zur Änderung des entsprechenden Parameters. Die Änderung der **Laserleistung** erfolgt stets CNC-gesteuert und – quasi instantan – innerhalb weniger Millisekunden. Dieser Parameter stellt die **einzige unmittelbare Regelgröße** dar. Die Variation des Strahldurchmessers folgt dagegen in allen Fällen der apparativen Umsetzung durch eine mechanische Verstellung. Aufgrund der Massenträgheit

der bewegten Teile lässt sich dieser Parameter nicht beliebig schnell und nur stetig verändern. Dies schränkt die Eignung als Regelgröße ein. Alle im Kapitel 2.4.2 vorgestellten Systeme zur Dosierung und Förderung des pulverförmigen Zusatzwerkstoffs sind ebenfalls steuerbar. Die Reaktionszeit zwischen Signaleingang und Änderung des geförderten Pulvermassenstroms in der Wechselwirkungszone wird – unabhängig vom Förderprinzip – in erster Linie beeinflusst von der Weglänge, die das Pulver vom Dosiersystem bis zur Düsenaustrittsöffnung zurücklegen muss, und von der Geschwindigkeit der Partikel im Fördersystem. Die Reaktionszeit kann bis zu einigen zehn Sekunden betragen; durch diese Trägheit eignet sich der Pulvermassenstrom nur zur mittelbaren Steuerung des Prozessablaufs.

3.2.4 Pulverzufuhr und Pulvernutzungsgrad

Aus Bild 3.5 wird deutlich, dass insbesondere bei der Pulverzufuhr eine Einstellung gefunden werden muss, die unterschiedlichen Strahldurchmessern und Spurbreiten gleichermaßen gerecht wird. Dies beinhaltet die Abstimmung der Parameter, die die Pulverstrahlform beeinflussen (Pulverdüsendurchmesser, -winkel und -abstand sowie Transport- und Schutzgassstrom) und des Pulvermassenstroms auf den Variationsbereich des Laserstrahls.

Als guter Kompromiss erweist sich eine **Pulverstrahlform**, die stark gebündelt auf der Werkstückoberfläche auftrifft. Die elliptische Auftreffzone sollte dabei konzentrisch zur vom Laserstrahl beleuchteten Fläche positioniert und so eingestellt sein, dass die größere Achse dem größten eingesetzten Laserstrahldurchmesser entspricht. Für die Untersuchungen zu dieser Arbeit wurde dies durch eine Pulverdüse mit Durchmesser $d_P = 1$ mm erzielt, die mit Hilfe eines umgebenden Ringstrahls aus Schutzgas einen gebündelten Pulverstrahl mit einem vom Pulvermassenstrom unabhängigen Aufweitungswinkel β_P von ca. 5° liefert (**Bild 3.6**). Bei einem Pulverdüsenabstand $l_P = 12$ mm zur Werkstückoberfläche ergibt sich so eine Auftreffzone mit einer Breite von ca. 1,9 und einer Länge von ca. 2,3 mm. Es ist offensichtlich, dass

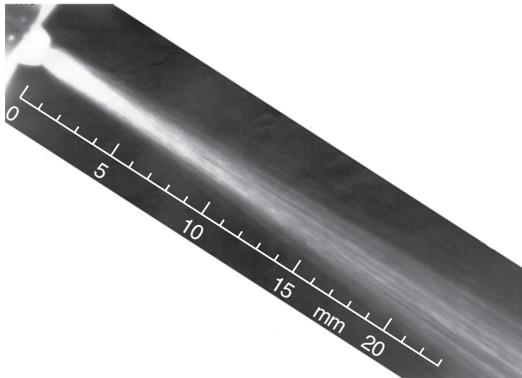


Bild 3.6: Aufnahme des Pulverstrahls: Durch den umgebenden Schutzgasmantel wird die Aufweitung auf ca. 5° begrenzt.

mit diesem konstanten Pulverstrahlkegel gute Pulvernutzungsgrade η_P nach Gl. (2.4) nur bei großen Laserstrahldurchmessern erreicht werden können. Bei Strahldurchmessern, die kleiner als die größere Achse der elliptischen Pulverauffreffzone sind, wird nur ein Teil des zugeführten Pulvers aufgeschmolzen; die Pulvernutzungsgrade sind hier beträchtlich kleiner.

Wie bereits in Tabelle 3.1 erwähnt, war der **geförderte Pulvermassenstrom** (zum Beispiel auch für die Erzeugung aller in den Bildern 3.3 und 3.4 gezeigten Spuren) mit $\dot{m}_P = 6 \text{ g/min}$ **stets konstant**. Hinsichtlich der für verschiedene Spurbreiten notwendigen spezifischen Pulvermasse einerseits und der unterschiedlichen Pulvernutzungsgrade andererseits stellt sich die Frage, welche Effekte eine spurbreitenspezifische Abstimmung des geförderten Massenstroms \dot{m}_P am Pulverförderer überflüssig gemacht haben.

Für den notwendigen **aufzuschmelzenden Pulvermassenstrom** gilt

$$\dot{m}_L = \Delta F_S \cdot \rho_P \cdot v \quad . \quad (3.3)$$

In einer ersten Näherung kann die Zunahme der Stapelquerschnittsfläche pro aufgetragener Spur nach

$$\Delta F_S \approx b_S \cdot h_S \quad (3.4)$$

als rechteckiger Flächenanteil mit Hilfe von Spurbreite b_S und Spurbhöhe h_S angenommen werden. Bei stets konstanter Vorschubgeschwindigkeit und Spurbhöhe folgt

$$\dot{m}_L \sim b_S \quad . \quad (3.5)$$

Dieser proportionale Zusammenhang zwischen notwendigem aufzuschmelzendem Pulvermassenstrom und Spurbreite zeigt sich auch deutlich bei der genaueren Betrachtung der Querschnittsflächenzunahme im Experiment: Die ausgemessenen Querschnittsflächen aus den Bildern 3.3 und 3.4 sind in **Bild 3.7** über der Spurbreite aufgetragen.

Der durch den **Pulvernutzungsgrad** η_P ausgedrückte Anteil des tatsächlich für den Prozess genutzten Pulvers \dot{m}_L am geförderten Pulvermassenstrom \dot{m}_P hängt ab von den Parametern

- Pulverart,
- Pulverstrahlform und -anordnung aus den o.g. bestimmenden Größen,
- Laserstrahlwellenlänge λ ,
- Vorschubgeschwindigkeit v ,
- geförderter Pulvermassenstrom \dot{m}_P ,
- Leistungsdichte I und
- Laserstrahldurchmesser d_L .

Während die fünf zuerst genannten Punkte in der gewählten Anlagenkonfiguration konstant bleiben, muss die Leistungsdichte während der Spurbreitenvariation stets so eingestellt sein, dass sich ein stabiler (quasistationärer) Prozess einstellt. Dies ist der Fall, wenn ausreichend Leistungsdichte zur Verfügung steht, um den angebotenen Pulvermassenstrom aufzuschmelzen. Sind alle genannten Parameter festgelegt, kommt schließlich dem Laserstrahldurchmesser bzw. der räumlichen Ausdehnung des Wechselwirkungsbereichs zwischen Pulver- und Laserstrahl eine entscheidende Rolle bei der Beeinflussung des Pulvernutzungsgrads zu. Wie in

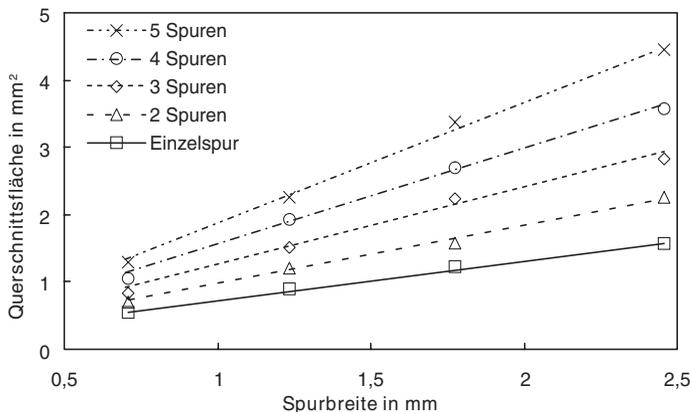


Bild 3.7: Die gemessenen Querschnittsflächen der Spurstapel aus den Bildern 3.3 und 3.4 zeigen den linearen Zusammenhang zwischen Spurbreite b_S , Querschnittsflächenzunahme ΔF_S und damit aufzuschmelzendem Pulvermassenstrom \dot{m}_L nach Gl. (3.5).

Bild 3.5 skizziert, findet die gesamte Wechselwirkung auf dem Weg der Pulverpartikel durch den Laserstrahl sowie im Schmelzbad der Breite des Laserstrahldurchmessers statt:

- Partikel, die in das Schmelzbad treffen, tauchen darin ein, werden aufgeschmolzen und tragen zum Spuraufbau bei (siehe auch Kapitel 3.3).
- Je nach Schmelzbadlänge hinter dem Laserstrahl werden so teilweise auch Partikel erfasst, die zunächst durch den Laserstrahl hindurchtreten, um hinter ihm mit einer gewissen Vorwärmung auf die Oberfläche zu treffen.
- Dagegen prallen Pulverpartikel, die vor dem Laserstrahl auftreffen oder ihn seitlich passieren, vom ungeschmolzenen Substrat ab, ohne zum Spuraufbau beizutragen.

Unter der – durch Bild 3.6 gestützten – Annahme, dass das Volumen des Pulverstrahlkegels ausreichend gleichmäßig mit Pulverpartikeln durchsetzt ist und die o.g. Parameter konstant bleiben, kann das Durchdringungsvolumen von Laser- und Pulverstrahl in einem stabilen Prozess als Maß für den Pulvernutzungsgrad herangezogen werden. **Bild 3.8** zeigt die Ergebnisse der numerischen Berechnung des Durchdringungsvolumens über dem Laserstrahldurchmesser d_L für unterschiedliche Pulverdüsenswinkel α_P . Der Laserstrahl wurde dabei modellhaft als Zylinder, der Pulverstrahl als Kegel angenommen. Für Pulverdüsenswinkel bis ca. 55° zeigt sich in dem in dieser Arbeit betrachteten Variationsbereich des Laserstrahldurchmessers ein **breiter Bereich mit nahezu linearer Zunahme** des Durchdringungsvolumens.

Als Maß für den Pulvernutzungsgrad herangezogen, erklärt dieser nahezu lineare Anstieg, warum in der gewählten Anlagenkonfiguration mit unidirektionaler Pulverzufuhr unter einem Pulverdüsenswinkel α_P von 55° stets mit konstantem geförderten Pulvermassenstrom \dot{m}_P gearbeitet werden kann: Der für den Prozess genutzte Anteil des geförderten Massenstroms steigt linear mit wachsendem Laserstrahldurchmesser an und bedient damit den ebenfalls li-

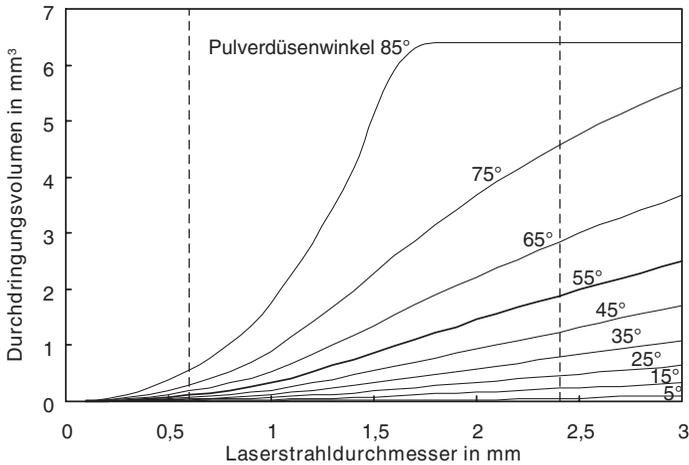


Bild 3.8: Durchdringungsvolumen von Pulver- und Laserstrahl in Abhängigkeit des Pulverdüsenwinkels α_P für unterschiedliche Laserstrahldurchmesser d_L (übrige Parameter gemäß Tabelle 3.1). Gestrichelt eingezeichnet sind minimaler und maximaler in dieser Arbeit betrachteter Laserstrahldurchmesser.

near ansteigenden Bedarf an notwendiger aufgeschmolzener Pulvermasse für den Aufbau von Spuren der jeweiligen Breite und konstanter Höhe nach Gl. (3.5).

Aus Bild 3.7 wird auch sichtbar, dass die zunächst auf ebenem Grundmaterial erzeugten Spurquerschnittsflächen größer sind als die in den Folgespuren erzielten Flächenzunahmen ΔF_S . Die Gründe liegen in der höheren Leistungsdichte, die für die erste Spur eingestellt werden muss, um die anfänglich höhere Wärmeabfuhr in das Grundmaterial auszugleichen (vgl. Bild 2.2 auf Seite 25) und in einer unterschiedlichen Schmelzbadgeometrie: Wie in Kapitel 3.3 anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gezeigt wird, bildet sich das Schmelzbad auf ebenem Grundmaterial als geneigte Front aus, die auftreffende Partikel besser aufzufangen vermag als das sich auf bereits gewölbtem Untergrund ausbildende kugelförmige Schmelzbad im Falle von Folgespuren. Wie in **Bild 3.9** gezeigt, bewegen sich die nach den Gleichungen 2.4 und 3.3 berechneten Pulvernutzungsgrade in der gewählten Anlagenkonfiguration unter Einsatz des Werkstoffs Fe410 beim Generieren auf ebenem Grundmaterial im Bereich von 33 % für den kleinsten bis 92 % für den größten betrachteten Strahldurchmesser, beim Generieren von Folgespuren im Bereich von 11 bis 43 %.

3.2.5 Werkstoffe

Die für die Untersuchungen verwendeten Grundkörper bestehen aus St52 und 16MnCr5. Als pulverförmige Zusatzwerkstoffe wurden für die vorliegenden Untersuchungen Fe 6063 und

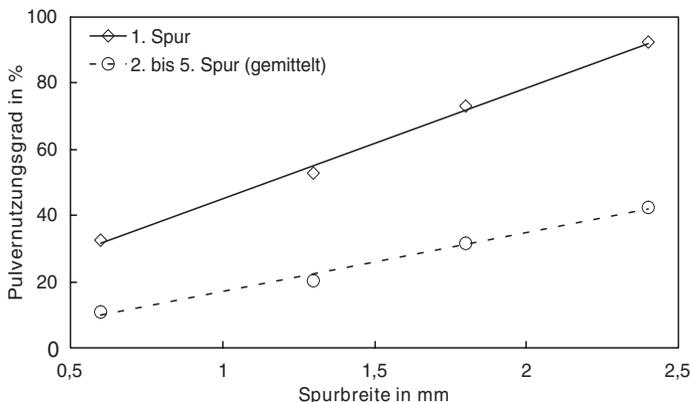


Bild 3.9: Pulvernutzungsgrad für den Werkstoff Fe410 über Strahldurchmesser für die erste Spur auf ebenes Substrat (erhöhte Leistungsdichte) und für Folgespuren.

Fe 410 verwendet, zwei **Eisenbasislegierungen**, die auch in werkstofflicher Hinsicht weitgehend seriennahe Prototypen durch Lasergenerieren ermöglichen. Ferner kam vereinzelt Stellite 6 als häufig verwendeter Zusatzwerkstoff zur Herstellung von verschleißfesten Schichten zum Einsatz. Eine Übersicht der verwendeten Zusatzwerkstoffe gibt **Tabelle 3.2**.

Je nach Herstellverfahren der Pulverwerkstoffe (Wasser- oder Gasverdüsung) weisen die Partikel unterschiedliche Formen auf, die die **Rieselfähigkeit** wesentlich beeinflussen. **Bild 3.10** zeigt die drei eingesetzten Pulverwerkstoffe in rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen identischer Vergrößerung. Als optimal hinsichtlich der Pulverförderung hat sich eine möglichst kugelförmige Partikelgeometrie erwiesen, wie sie die Werkstoffe Fe410 und Stellite 21 aufweisen. Die kantigen, sehr unregelmäßig in Form und Größe ausgeprägten Partikel des Werkstoffs Fe6063 neigten in den Versuchen mehr zur lokalen Verklumpung im Pulvertransportsystem,

Gew.-%	Fe 6063	Fe 410	Stellite 6
C	0,04	0,13	1,2
Co	–	–	Rest
Cr	19,9	12,5	28,3
Fe	Rest	Rest	0,1
Mn	–	0,68	–
Ni	17,1	0,26	0,9
P	–	–	0,015
S	–	–	0,019
Si	1,04	0,28	1,12
W	–	–	4,5

Tabelle 3.2: Legierungsbestandteile in Gew.-% der in dieser Arbeit verwendeten Zusatzwerkstoffe [175, 176].

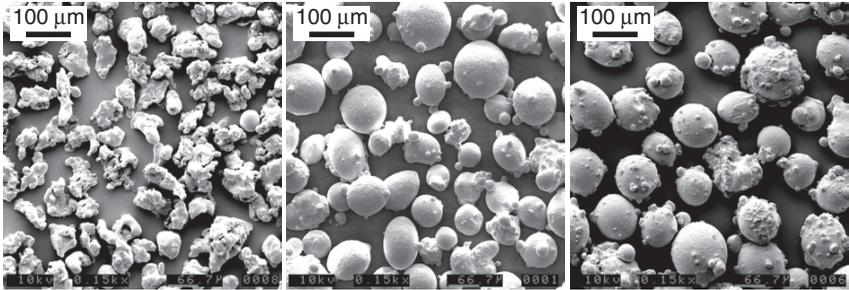


Bild 3.10: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Partikeln verschiedener Pulverwerkstoffe: Fe6063 (links), Fe410 (Mitte), Stellite 21 (rechts).

was zu einer verringerten Betriebssicherheit der Anlage führte.

Zusätzlich wird die Rieselfähigkeit durch **hygroscopische Wasseraufnahme** negativ beeinflusst: **Bild 3.11** zeigt die Massenzunahme von unterschiedlichen Pulverproben während der Lagerung in mit Feuchtigkeit gesättigter Luft bei Zimmertemperatur. Die Kurven zeigen ein Sättigungsverhalten, das nach ein bis zwei Stunden abgeschlossen ist. Die Wasseraufnahme der Fe6063-Partikel aus der Umgebung ist dabei um ein Vielfaches höher als die der anderen Werkstoffe, was in der in Bild 3.10 sichtbaren größeren Oberfläche begründet liegt. Zur Sicherstellung einer stets gleichmäßigen Rieselfähigkeit wurden alle Zusatzwerkstoffe durch Sieben auf 50 bis 120 µm fraktioniert und vor der Verarbeitung zwei Stunden bei einer Temperatur von 95 °C ausgeheizt.

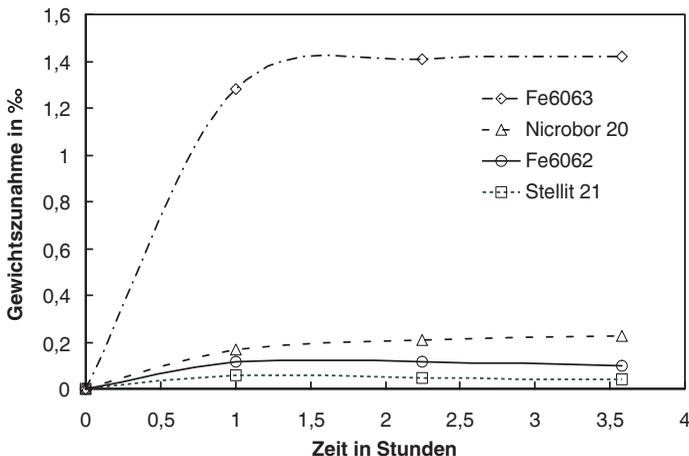


Bild 3.11: Hygroscopische Wasseraufnahme verschiedener Pulverwerkstoffe über der Zeit in mit Feuchtigkeit gesättigter Luft bei Zimmertemperatur.

3.3 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Das Lasergenerieren vermag in einem quasistationären Prozess sehr gleichmäßige Spurgeometrien zu erzeugen. Zu Beginn eines Beschichtungsvorgangs muss jedoch eine instationäre Phase bzw. Bearbeitungslänge überwunden werden, in der noch nicht der angestrebte konstante Spurquerschnitt entsteht. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass Schutzgas und Zusatzwerkstoff kontinuierlich zugeführt werden und der Beginn des Beschichtungsprozesses vom Einschalten des Laserstrahls eingeleitet wird.

Die instationäre Phase unmittelbar nach dem Einschalten des Laserstrahls spielt dann eine untergeordnete Rolle, wenn geschlossene „gefäßförmige“ Konturen erzeugt werden, die in einer spiralförmigen Verfahrbewegung mit kontinuierlicher Höhenzustellung ohne Unterbrechung des Prozesses generiert werden können. Dagegen ist die Beherrschung der instationären Abschnitte bei der Erzeugung von offenen Konturen besonders wichtig, da hier der Prozess durch aus- und einschalten des Laserstrahls ständig unterbrochen und wieder neu gestartet werden muss. In **Bild 3.12** sind eine geschlossene und eine offene Kontur skizziert, und es wird deutlich, dass Laserein- und -ausschaltunkte an den Kanten der Kontursegmente liegen. Geometriefehler einzelner Spuren haben unmittelbar Einfluss auf die Geometrie der Kanten. Die Ursache für die typischerweise auftretenden Geometriefehler einzelner Spuren ist ein Wärmestau, der sich an den Kanten eines Segments durch die behinderte Wärmeableitung einstellt. Dadurch kommt es zu kuppelhaften Überhöhungen oder Verbreiterungen des Spurquerschnitts [15, 24].

Die Entstehung einer Auftragsspur beim Beschichtungsprozess wird in [140] modellhaft beschrieben. Die instationäre Phase wird dabei in zwei Zeiträume eingeteilt: Der erste dauert vom Einsetzen der Laserstrahlung bis zum Aufheizen des Grundmaterials auf Schmelztemperatur, was durch die Entstehung einer ersten Schmelzzone („Schmelzpfütze“) auf dem Werkstück zum Zeitpunkt t_1 gekennzeichnet ist. Es schließt sich ein Zeitraum an bis zum Zeitpunkt t_2 , zu dem quasistationäre Verhältnisse erreicht sind und die erzeugte Spurquerschnittsfläche konstant ist.

Um die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl, Pulverpartikeln und Schmelzbad zu beobachten und die Mechanismen bei Spurstart und -ende zu untersuchen, wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Wechselwirkungszone angefertigt. Verwendet wurde dazu eine Kamera vom Typ *Kodak Ektapro HS Prozessor 4540* mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 2250 oder

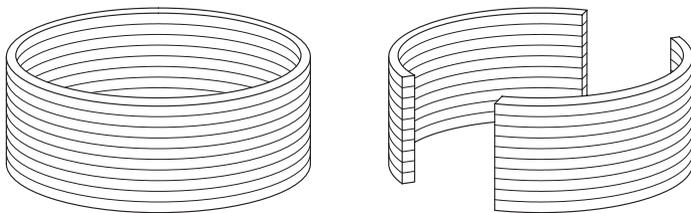


Bild 3.12: Geschlossene (links) und offene Konturen (rechts) in Bauteilen.

4500 Bildern pro Sekunde. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 600 mm/min beträgt die Bearbeitungsstrecke zwischen zwei Bildern somit 4,4 oder 2,2 μm . Maßgebend für deutliche Aufnahmen ist bei derart kurzen Belichtungszeiten eine wirksame Beleuchtung, die in diesem Fall von einem separaten Beleuchtungslaser vom Typ *Adlas DPY421 Q/QD* mit einer Wellenlänge von 523 nm geliefert wurde. Mit einem entsprechenden Bandpassfilter, der vor dem Makroobjektiv der Kamera angebracht war, wurde Störstrahlung ausgeblendet. Durch ein spezielles Triggergerät wurde während der Belichtungszeit der Kamera von 0,44 ms ein deutlich kürzerer Belichtungspuls des Beleuchtungslasers ausgelöst. Die räumliche Anordnung der Kamera zum Werkstück zeigt **Bild 3.13**.

3.3.1 Aufschmelzen der Partikel

Verschiedene Untersuchungen beschäftigten sich mit der prinzipiellen Frage, ob die Pulverpartikel bereits auf ihrem Weg durch den Laserstrahl, also vor dem Auftreffen auf das Schmelzbad, aufgeschmolzen werden oder nicht.

In [141] werden die Weglängen von Eisenpartikeln (Schmelztemperatur $T_S = 1540^\circ\text{C}$) unterschiedlicher Größe durch ein CO_2 -Laserstrahlungsfeld bis zum Aufschmelzen berechnet. Dabei werden die Verluste durch Strahlung und Konvektion bei einer angenommenen Partikelgeschwindigkeit von $v_P = 2,1 \text{ m/s}$ an den einzelnen Teilchen berücksichtigt. Je nach

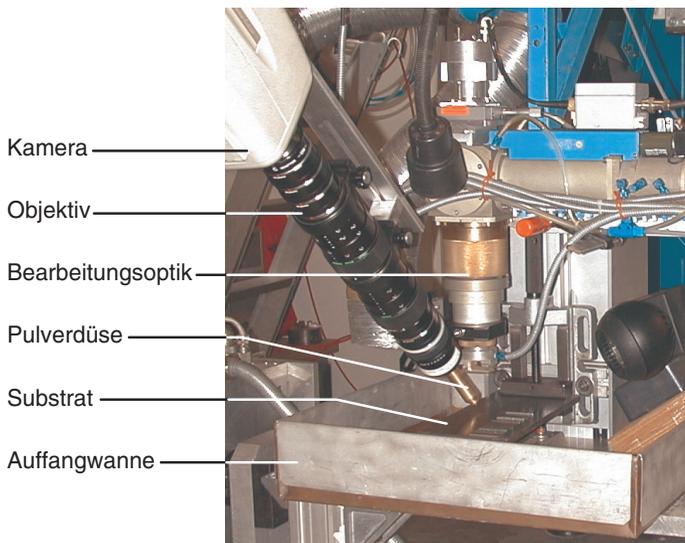


Bild 3.13: Versuchsanordnung für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Nicht im Bild ist der Beleuchtungslaser, dessen Strahl zwischen Pulverdüse und Kameraobjektiv hindurch auf die Wechselwirkungszone trifft.

Partikelgröße und Leistungsdichte der Laserstrahlung ergeben sich die in **Tabelle 3.3** wiedergegebenen Wechselwirkungszeiten bis zum Erreichen der Schmelztemperatur durch Absorption.

Bezogen auf die vorliegenden Randbedingungen dieser Arbeit (siehe Tabelle 3.1 auf Seite 48) mit Leistungsdichten zwischen $1,2 \cdot 10^4$ und $3,9 \cdot 10^4$ W/cm² und einer typischen Weglänge durch den Laserstrahl von $l_P = 12$ mm ergibt sich eine mittlere Wechselwirkungszeit von 5,7 ms. Unter der höheren Absorption von Nd:YAG-Laserstrahlung müsste also zumindest ein Teil des auf Partikeldurchmesser von 50 bis 120 µm fraktionierten Zusatzwerkstoffs bereits vor dem Auftreffen auf das Grundmaterial aufschmelzen.

Demgegenüber kommen die Betrachtungen in [140] zur Wechselwirkung des Pulverwerkstoffs MPA 551 (NiCrBSi, Schmelztemperatur $T_S = 1100$ °C) mit CO₂-Laserstrahlung zu dem Ergebnis, dass die Pulverpartikel auf ihrem Weg durch den Laserstrahl zwar Strahlung absorbieren, jedoch *nicht* aufgeschmolzen werden.

In den Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen konnten die Partikel auf ihrem Weg durch den Laserstrahl nun genau beobachtet werden. Da der Lichtpuls des Beleuchtungslasers wesentlich kürzer war als die Belichtungszeit der Kamera, lässt sich sehr deutlich unterscheiden, ob die Pulverpartikel bereits auf ihrem Weg durch den Laserstrahl aufgeschmolzen werden oder nicht: Feste Pulverpartikel reflektieren lediglich den Lichtpuls des Beleuchtungslasers und erscheinen auf einem Standbild als Punkte. Aufgeschmolzene Partikel dagegen emittieren aktiv in einem von der Kamera detektierten Spektrum, sie sind deshalb über die Dauer des Beleuchtungspulses hinaus während der gesamten Belichtungszeit der Kamera sichtbar und erscheinen so im Einzelbild als Striche, die die Flugbahn der Partikel nachzeichnen. Bei den für das Lasergenerieren in einem stabilen Prozess verwendeten Parametern konnte *kein* Aufschmelzen der Partikel im Laserstrahl festgestellt werden. Vielmehr treffen die Partikel im festen Aggregatzustand auf der Werkstückoberfläche auf. Im Falle einer festen Oberfläche prallen die Partikel ab und verlassen die Wechselwirkungszone, ohne zum Materialauftrag beizutragen. Selten ist auch ein Anhaften einzelner Partikel zu beobachten. Nur wenn die Partikel auf eine schmelzflüssige Oberfläche treffen, tauchen sie ein und werden aufgeschmolzen.

Die mittels der Videoaufnahmen gemessene Partikelgeschwindigkeit v_P beträgt 2,3 m/s. Dies entspricht dem Bereich der Werte aus der Literatur von 2,1 m/s [141], 2,5 m/s [145] und 3,387 m/s [140].

Partikelgröße	Leistungsdichte		
	$I = 1 \cdot 10^4$ W/cm ²	$I = 2 \cdot 10^4$ W/cm ²	$I = 5 \cdot 10^4$ W/cm ²
10 µm	4,3 ms	1,4 ms	0,5 ms
40 µm	14,3 ms	6,2 ms	2,4 ms
100 µm	28,6 ms	19 ms	6,7 ms

Tabelle 3.3: Berechnete Wechselwirkungszeiten von Eisen-Partikeln mit CO₂-Laserstrahlung bis zum Erreichen der Schmelztemperatur nach [141].

3.3.2 Spurentstehung

Bild 3.14 zeigt ein beispielhaftes Standbild aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Wegen des relativ niedrigen Kontrasts und einer – durch die Überlagerung von zwei zeitlich leicht versetzten Fernseh-Halbbildern bedingten – leichten Unschärfe eignen sich diese Bilder im Original nur bedingt für die Wiedergabe in gedruckter Form. Für eine deutlichere Darstellung in dieser Arbeit sind die bewegten Videoaufnahmen in Zeichnungen umgesetzt worden, in denen die Schmelzbad- und Spurgeometrien von Standbildern der digitalisierten Videoaufnahmen maßstäblich abgenommen wurden. Die Anordnung und Vorschubrichtung entspricht der aus Bild 3.5, die Blickrichtung auf die Wechselwirkungszone ist seitlich von schräg oben (siehe Bild 3.13). Im Gegensatz zu den Originalaufnahmen sind in den Skizzen keine Partikel aus dem Pulverstrom, dafür jedoch die Lage und der Durchmesser des Laserstrahls als Zylinder eingezeichnet. Die untere Fläche des Zylinders markiert die ursprüngliche Bearbeitungsebene in z-Richtung. Zudem wird in den Skizzen die auslaufende Seite der generierten Spur zur besseren Verständlichkeit in einem größeren Bereich gezeigt, als er mit der Kamera aufgenommen werden konnte. Verschiedene Zeitpunkte sind unter Angabe der fortlaufenden Zeit ab dem Lasereinschaltzeitpunkt ($t = 0$ ms) untereinander dargestellt.

3.3.2.1 Spurstart

Die Entstehung einer lasergenerierten Spur auf **Grundmaterial** bei einem **Laserstrahldurchmesser** $d_L = 0,8$ mm und einer Leistungsdichte von $I = 3,9 \cdot 10^4$ W/cm² zeigt **Bild 3.15**. Die Vorgänge lassen sich anhand charakteristischer Zeitpunkte wie folgt beschreiben:

t = 0 ms: Der Laserstrahl ist eingeschaltet und die Aufheizphase der Werkstückoberfläche beginnt.

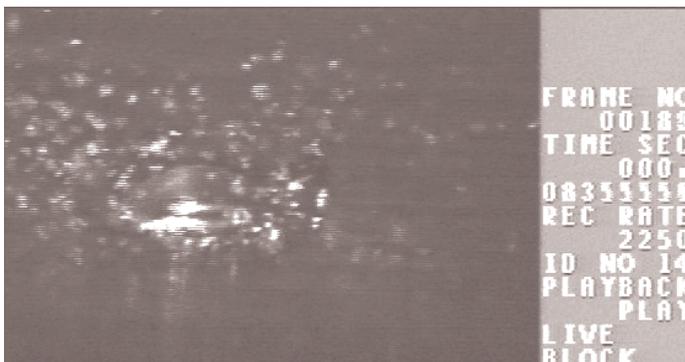


Bild 3.14: Beispielhaftes Standbild aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen: Ein Schmelztropfen entsteht auf ebenem Grundmaterial (vgl. Bild 3.15, $t = 67$ ms). Von links oben strömt der Pulverwerkstoff ein, der Bearbeitungslaserstrahl ist unsichtbar.

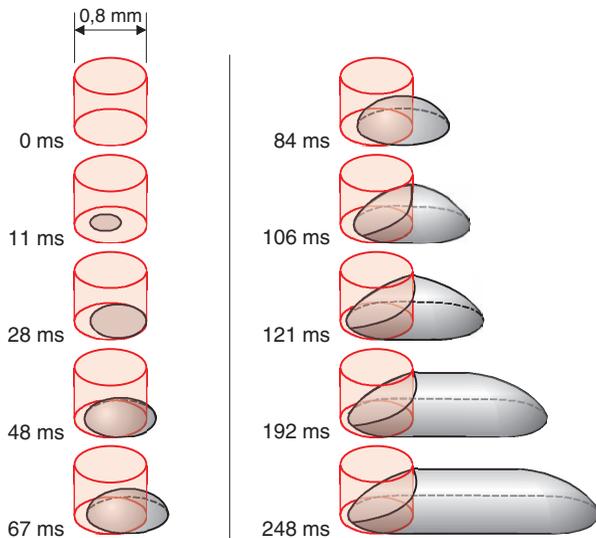


Bild 3.15: Spurstart auf Grundmaterial beim Einschalten des Laserstrahls mit Strahldurchmesser $d_L = 0,8$ mm. Konstante Parameter siehe Tabelle 3.1 auf Seite 48, Leistung temperaturgeregelt auf $P_L \approx 195$ W ($I \approx 3,9 \cdot 10^4$ W/cm²).

- t = 11 ms:** Eine erste Schmelzzone entsteht ausgehend vom Zentrum des Laserstrahls. Anhaftende Partikel in dieser Zone werden aufgeschmolzen.
- t = 28 ms:** Die Schmelzzone wird durch die Vorschubbewegung ellipsenförmig aufgezogen. Auf die schmelzflüssige Oberfläche auftreffende Pulverpartikel tauchen ein und werden aufgeschmolzen.
- t = 48 ms:** Durch das zusätzlich aufgeschmolzene Material wölbt sich ein Schmelztropfen auf, der zunächst in Länge und Breite gleichermaßen zunimmt.
- t = 67 ms:** Mit wachsender Höhe und Oberfläche werden immer mehr Pulverpartikel vom Schmelztropfen aufgefangen. Durch den Vorschub ergibt sich eine längliche Form.
- t = 84 ms:** Der Laserstrahl hat in etwa die Strecke seines eigenen Durchmessers auf dem Werkstück zurückgelegt. Der der Vorschubrichtung abgewandte Bereich des Schmelztropfens, der aus dem Laserstrahl herausläuft, beginnt zu erstarren. Es bildet sich eine geneigte Schmelzfront aus.
- t = 106 ms:** Die Schmelzfront befindet sich noch nicht ganz im quasistationären Gleichgewicht, die Spurhöhe nimmt noch geringfügig zu.
- t = 121 ms:** Der quasistationäre Gleichgewichtszustand ist erreicht: Die Spurhöhe am auslaufenden Teil der Schmelzfront bleibt konstant. Auch der sichelförmige, nicht aufgeschmolzene Bereich des Grundmaterials unter dem vorderen Teil des Laserstrahls bleibt konstant: In dieser Zone wird der Grundwerkstoff auf Schmelztemperatur erwärmt.

Für den **Strahldurchmesser** $d_L = 2,4$ mm ergibt sich unter den vorgegebenen Parametern eine Leistungsdichte von $I = 1,4 \cdot 10^4$ W/cm². Die Entstehung der Spur verläuft nach den

selben Mechanismen wie bei kleineren Strahldurchmessern. Durch die konstante Vorschubgeschwindigkeit ist der relative, auf den Laserstrahldurchmesser bezogene Vorschub jedoch geringer, so dass die Vorgänge entsprechend langsamer sind. **Bild 3.16** zeigt wiederum die Momentaufnahmen der charakteristischen Zeitpunkte. Sie lassen sich wie folgt beschreiben:

- t = 0 ms:** Der Laserstrahl ist eingeschaltet und die Aufheizphase beginnt.
- t = 22 ms:** Eine erste Schmelzzone bildet sich im Zentrum der Laserstrahlfläche.
- t = 45 ms:** Die Schmelzzone nimmt in der Größe zu, bleibt aber zunächst noch eben.
- t = 82 ms:** Ein Schmelztropfen wölbt sich durch den Materialeintrag aufgeschmolzener Pulverpartikel auf.

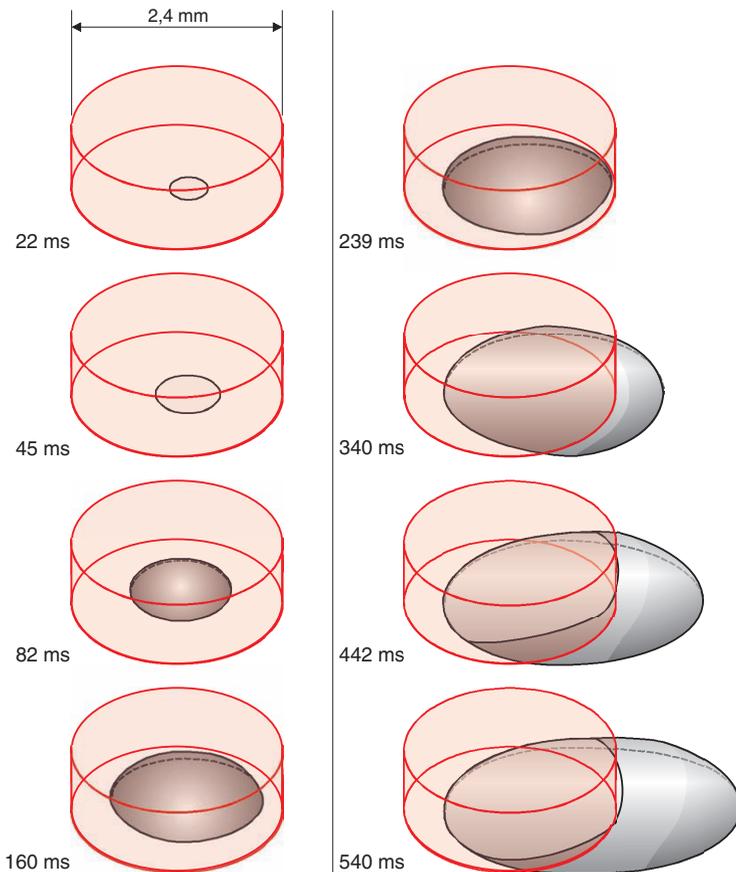


Bild 3.16: Spurstart auf Grundmaterial beim Einschalten des Laserstrahls mit Strahldurchmesser $d_L = 2,4$ mm. Konstante Parameter siehe Tabelle 3.1 auf Seite 48, Leistung temperaturgeregelt auf $P_L \approx 465$ W ($I \approx 1,4 \cdot 10^4$ W/cm²).

- t = 160 ms:** Der Schmelztropfen wächst zunächst gleichmäßig in Länge, Breite und Höhe.
- t = 239 ms:** Der Laserstrahl hat in etwa die Strecke seines eigenen Durchmessers auf dem Werkstück zurückgelegt.
- t = 340 ms:** Der auslaufende Teil der generierten Spur beginnt zu erstarren und es bildet sich eine klar abgegrenzte Schmelzfront heraus. Die Spur hat ihre Zielbreite erreicht. Der sichelförmige Bereich unaufgeschmolzenen Grundmaterials auf der einlaufenden Laserstrahlseite bleibt in Größe und Form konstant.
- t = 442 ms:** Die Schmelzfront hat ihre maximale Höhe erreicht. Der Prozess ist quasistationär.

Im direkten Vergleich der Vorgänge mit diesen beiden Strahldurchmessern werden die **unterschiedlichen Prozess-Charakteristika** deutlich, die sich zunächst auf die instationäre Phase, später aber auch auf den quasistationären Prozessablauf und auf seine Robustheit gegenüber Parameterschwankungen oder äußere Störungen auswirken: Im Falle des kleinen Strahldurchmessers wirkt eine relativ hohe Leistungsdichte in kurzer Wechselwirkungszeit ein; die Schmelzbadbewegungen sowie die Abkühlung der Schmelze sind vergleichsweise schnell. Im Falle des großen Strahldurchmessers, in dem eine deutlich geringere Leistungsdichte über die dreifache Wechselwirkungszeit einwirkt, läuft der Spuraufbau vergleichsweise träge und gleichmäßig, so dass zum Beispiel kurzzeitige Fluktuationen der Pulverzufuhr besser ausgemittelt werden können. Als gemeinsames Merkmal lässt sich bei allen Strahldurchmessern ein sichelförmige Bereich unaufgeschmolzenen Grundmaterials auf der einlaufenden Laserstrahlseite beobachten, in dem das Grundmaterial auf Schmelztemperatur gebracht wird. Seine Größe wird – bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit – von der eingestrahlten Leistungsdichte bestimmt.

Im Gegensatz zu den Grundspuren auf ebenem Material zeigt die Entstehung der **Folgespuren** durch den unebenen Untergrund einen anderen Verlauf der instationären Phase. Für den **Laserstrahldurchmesser $d_L = 0,8 \text{ mm}$** ist der Prozessstart in **Bild 3.17** skizziert und lässt sich wie folgt beschreiben:

- t = 0 ms:** Der Laserstrahl ist eingeschaltet und die Aufheizphase beginnt.
- t = 42 ms:** Der Laserstrahl befindet sich vollständig über der darunterliegenden Spur. Durch ihre Kuppenform wird der schleppend (im Bild von links, nicht eingezeichnet) zugeführte Pulverstrahl zunächst noch abgeschirmt. Die Wechselwirkungszone liegt zudem tief und außerhalb des Laserfokus, so dass der Prozess nur zögerlich in Gang kommt.
- t = 62 ms:** Auf der Oberfläche der ersten generierten Spur entsteht eine erste Schmelzzone im Zentrum des Laserstrahls, deren Größe im weiteren Verlauf stetig zunimmt. Zunächst hat das Schmelzbad eine negative Steigung.
- t = 131 ms:** Das Material der darunterliegenden Spur ist unter dem Laserstrahl weitgehend aufgeschmolzen. Die Winkel der Schmelzbadfront ist Null. Alle auf die schmelzflüssige Oberfläche auftreffenden Pulverpartikel tragen jetzt zum Materialaufbau bei.
- t = 180 ms:** Das Schmelzbad wölbt sich durch das zusätzlich eingebrachte Material auf. Das aufgeschmolzene Material des darunterliegenden Spurbeginns erstarrt.
- t = 234 ms:** Der Winkel der Schmelzbadfront wird stetig steiler. Das Schmelzbad wird zunehmend mit aufgeschmolzenem Zusatzwerkstoff gespeist, so dass der Anteil an auf-

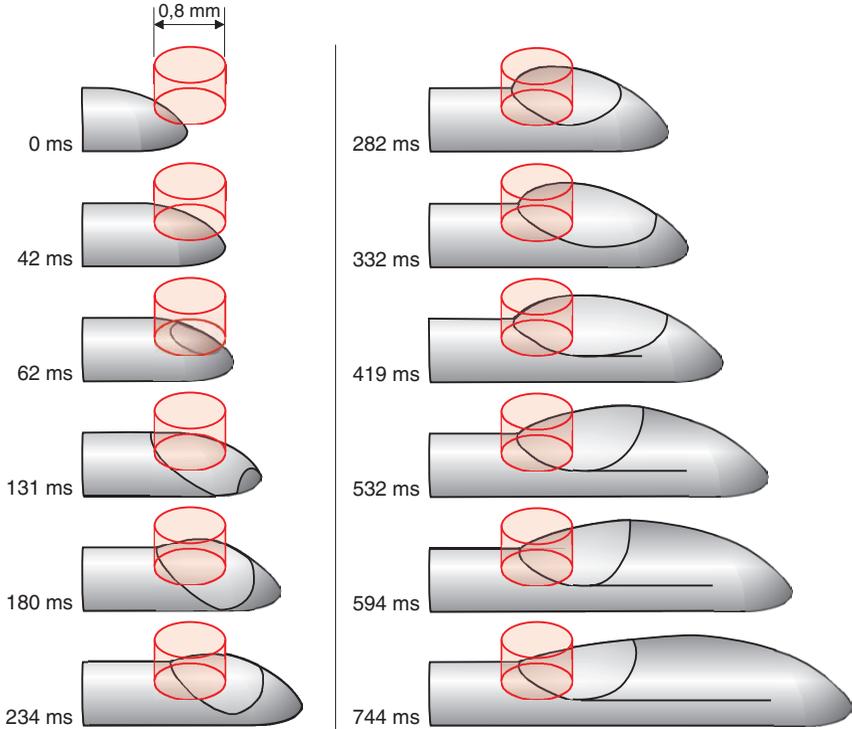


Bild 3.17: Spurstart einer Folgespur beim Einschalten des Laserstrahls mit Strahldurchmesser $d_L = 0,8$ mm. Konstante Parameter siehe Tabelle 3.1 auf Seite 48, Leistung temperatureregelt auf $P_L \approx 113$ W ($I \approx 2,8 \cdot 10^4$ W/cm²).

geschmolzenem Grundmaterial abnimmt.

- t = 332 ms:** Durch die starke anfängliche Aufheizung einerseits und die behinderte Wärmeabfuhr ins Werkstück andererseits erstarrt der Spuranfang nur langsam, so dass das Schmelzbad eine maximale Länge erreicht.
- t = 419 ms:** Der Spuranfang ist erstarrt und es bildet sich die charakteristische Grenzlinie zwischen den Schichten an der Seite der generierten Struktur aus.
- t = 532 ms:** Das Schmelzbad hat seine maximale Höhe erreicht, der Winkel der Schmelzbadfront ändert sich nicht mehr. Pulverpartikel, die hinter dem Laserstrahl auf noch flüssige Schmelze treffen, tauchen darin ein und tragen zum Spuraufbau bei.
- t = 594 ms:** Die Erstarrungsfront wandert mit der selben Vorschubgeschwindigkeit wie der Laserstrahl voran: Der Prozess ist quasistationär.

Aus diesen Beobachtungen ergeben sich folgende **prinzipielle Aussagen**, die bei der Erzeugung von vorgegebenen Sollgeometrien berücksichtigt werden müssen:

- Zu Beginn einer generierten Spur ist die **anfängliche Aufheizung des Werkstücks** besonders stark, da kein oder wenig Zusatzwerkstoff aufgeschmolzen und die eingekoppelte Leistung vollständig zur Temperaturerhöhung des darunterliegenden Materials aufgewandt wird.
- Eine Spur auf ebenem Grundmaterial **startet nicht an der Laserstrahlposition des Einschaltzeitpunkts**, sondern erst nach einer Länge Δx nach dem Einschaltpunkt. Diese Länge hängt ab von der Bildung der ersten Schmelzzone auf dem Ausgangsmaterial bzw. vom Erreichen der Schmelztemperatur, und ist damit um so kleiner, je höher Leistungsdichte sowie Bauteiltemperatur und je geringer Vorschubgeschwindigkeit, Schmelztemperatur sowie Wärmeableitung in das Bauteil sind.
- Da nur solche Partikel zum Materialauftrag beitragen, die auf eine schmelzflüssige Oberfläche treffen, **steigt der Pulvernutzungsgrad mit der Größe der Schmelzbadfläche** an. Pulvernutzungsgrad und Spurhöhe beginnen bei Null und nehmen stetig bis zum Wert des quasistationären Zustands, der durch die volle Ausbildung der geneigten Schmelzbadfläche gekennzeichnet ist, zu.
- In der Draufsicht wird dem Spurbeginn der **Radius des Laserstrahls** aufgeprägt. Die durch den Laserstrahldurchmesser vorgegebene Spurbreite ist erreicht, sobald sich der Rand der ersten Schmelzzone um eine dem Laserstrahlradius entsprechende Vorschublänge aus dem Laserstrahl herausbewegt hat. Die Spurbreite bleibt danach konstant.
- Die **Schmelzbadnormale** erfährt während des Beschichtungsstarts eine **wesentliche Verkipfung**, skizziert in **Bild 3.18**. Insbesondere zu Beginn einer Folgespur, bei der sich die erste Schmelzzone auf der Kuppe einer bereits generierten Spur bildet, muss eine Änderung des Winkels der Schmelzbadnormalen von bis zu 90° überwunden werden. Dieser Vorgang, der bis zur Ausbildung des stationären Neigungswinkels der Schmelz-

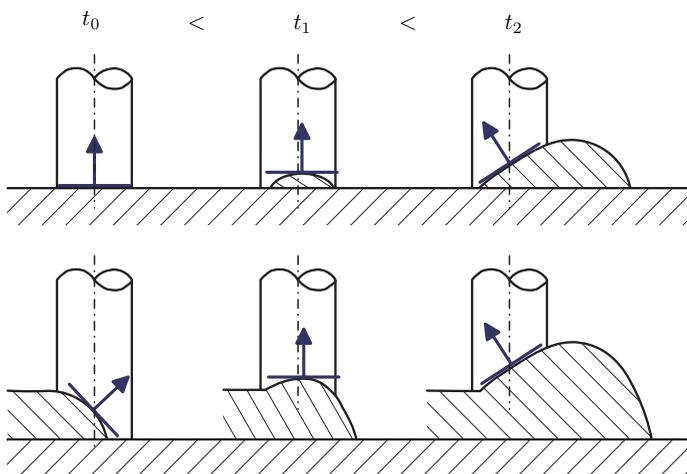


Bild 3.18: Verkipfung der Schmelzbadnormalen während der instationären Phase des Spurbeginns für das Generieren auf ebenem Grundmaterial (oben) und auf einer bereits bestehenden Spur (unten).

front andauert, bestimmt maßgeblich die Länge der instationären Phase im Verlauf des Spurstarts und hängt direkt von der generierten Spurhöhe ab. Zwar wird die Einkopplung der senkrecht einfallenden Laserstrahlung (von geringen Effekten beim Einsatz von linear polarisierter Laserstrahlung einmal abgesehen) nicht beeinträchtigt, der schleppend unidirektional zugeführte Pulverwerkstoff wird jedoch beim Start von Folgespuren ungünstig von der darunterliegenden Spur abgeschattet.

- Zusätzlich zur Verkippung erfährt der Schmelzbadmittelpunkt bei Prozessbeginn eine Höhenänderung, die im Bereich der generierten Spurhöhe liegt. Je nach Rayleigh-Länge des fokussierten Laserstrahls und damit der zulässigen Toleranz für die Einhaltung des Bearbeitungsabstands in z-Richtung kann die Leistungsdichte auf ungünstige Werte absinken, den Prozessstart verzögern und die instationäre Phase damit zusätzlich verlängern.

3.3.2 Spurende

Beim Abschalten des Laserstrahls auf ebenem Grundmaterial bleibt die geneigte Schmelzbadfront stehen und erstarrt. Je nach Schmelzbadtemperatur und -größe können noch einige Pulverpartikel eintauchen oder anhaften, was jedoch nicht mehr maßgeblich zum Materialauftrag beiträgt.

Wesentlicher für die entstehende Geometrie bei Folgespuren sind die jeweils herrschenden Wärmeleitungsbedingungen: Durch die behinderte Wärmeleitung am Ende einer Kontur steigt die lokale Bauteil- und die Schmelzbadtemperatur an, was zu einer Verbreiterung der generierten Spur in diesem Bereich führt. Bei Folgespuren wird dieser Mechanismus zusätzlich unterstützt, wenn die darunterliegende Spur bereits ein verbreitertes Konturende aufweist und damit eine Basis für die neuerliche Entstehung der Fehlgeometrie bietet. Auf diese Weise pflanzt sich dieser Konturfehler von Spur zu Spur eines Stapels leicht fort, was durch eine entsprechende Prozessregelung wirksam verhindert werden kann (Kapitel 4.7).

3.3.3 Schlussfolgerungen für die Bearbeitungsstrategie

Aus der vorangegangenen Zusammenfassung der Mechanismen, die den Beginn und das Ende von Einzelspuren beim Lasergenerieren beeinflussen, lassen sich direkt geeignete Maßnahmen ableiten, um die instationären Prozesszeiten und damit die Abweichungen der Spurgeometrien von den Sollquerschnitten zu minimieren.

Um den **Versatz des Startpunkts** einer Spur auf ebenem Grundmaterial zu minimieren, kann der Laserstrahl bereits an einem früheren Punkt zugeschaltet werden. Die vorzuhaltende Länge hängt dabei von Strahldurchmesser, Vorschubgeschwindigkeit, Bauteiltemperatur und Energiedichte ab. Für die in dieser Arbeit gewählten Prozessbedingungen liegt die vorzuhaltende Länge bei 35 bis 44 % des Laserstrahldurchmessers. Ebenfalls wirksam ist das möglichst rasche Erzeugen einer initialen Schmelzzone durch die Einstellung einer hohen

Leistungsdichte bei kleinem Strahldurchmesser und anschließend schneller Korrektur dieser Größen auf die angemessenen Werte der gewünschten Sollkontur.

Um die die **Startphase von Folgespuren** verzögernde Verkipfung der Schmelzbadfront zu minimieren, ist das vorangehende Abfräsen einer oberen Materialschicht sehr wirksam. Dies kann sowohl für freistehende Einzelspuren, als auch für komplette Materiallagen erfolgen. Dadurch werden zum einen an den Konturkanten ähnlich gute Bedingungen für die Folgeschicht geschaffen wie bei ebenem Grundmaterial. Zum anderen wird auch die Reproduktion von Beschichtungsfehlern im Untergrund über die gesamte Spurlänge vorsorglich unterbunden. Insbesondere bei der Integration des Generierungsprozesses in spanende Werkzeugmaschinen bietet sich eine solche einfache und qualitätserhöhende Zwischenbearbeitung an.

Die durch die verminderte Wärmeableitung an den Konturkanten hervorgerufenen Wärmestaueffekte und die daraus resultierenden **Spurverbreiterungen** lassen sich durch die Anpassung der Laserleistung wirksam verringern. Bewährt hat sich hier eine Laserleistungsregelung, der die Schmelzbadtemperatur als Eingangsgröße zu Grunde liegt (Kapitel 4.7.1). Ein wirksames Einhalten der Sollkonturen an den Bauteilkanten lässt sich jedoch auch durch das Konturfräsen der Seitenflächen erzielen. In Verbindung mit Messung der Schichtdicke (Kapitel 4.7.2) und einer intelligenten Steuerung, die die Bearbeitungsfolge je nach Bedarf verändern kann, lässt sich ein solcher zusätzlicher Fräs-Arbeitsgang auch nur dann zwischenschalten, wenn er notwendig ist.

4 Das Konzept eines modularen Fertigungssystems

Das Lasergenerieren als „lokal urformendes Verfahren“ bietet ein großes Potenzial für Anwendungen des Rapid Prototypings, der Herstellung von Einzelteilen und Kleinserien sowie der Reparatur vorhandener Bauteile. Aus der Darstellung der Verfahrensmerkmale in Kapitel 2.2.1 sind jedoch auch die Einschränkungen hinsichtlich der erzeugbaren Geometrien und Genauigkeiten, die aus der freien Erstarrung der Schmelze ohne formgebende Werkzeuge resultieren, deutlich geworden. Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, lässt sich die reproduzierbare Erzeugung von definierten Spürquerschnitten durch angepasste Prozessführung zwar optimieren und die Formtreue dadurch steigern; die Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität von technischen Bauteilen wird jedoch in der Regel nicht erreicht, weshalb eine spanende Nachbearbeitung lasergenerierter Materialvolumina notwendig ist [178].

Durch die Kombination des auftragenden Lasergenerierens mit abtragenden spanenden Verfahren werden große Potenziale genutzt und vorhandene Einschränkungen überwunden: Es bieten sich neue Möglichkeiten zur Erzeugung von Geometrien, die durch ein Bearbeitungsverfahren alleine nicht hergestellt werden könnten wie zum Beispiel Bauteile mit Eingeschnitten oder Hohlräumen. Gerade für kleinere Stückzahlen ist es dabei sinnvoll, unterschiedliche Bearbeitungsverfahren in eine Maschine zu integrieren. Dadurch lässt sich zum einen der notwendige Investitionsaufwand in Grenzen halten, zum anderen können die Bauteile in wenigen Aufspannungen unter wechselweiser Anwendung der verfügbaren Bearbeitungsverfahren gefertigt und der Anteil manueller Tätigkeiten verringert werden. Moderne Werkzeugmaschinen wie zum Beispiel Bearbeitungszentren, die eine breite Palette an Möglichkeiten der konventionellen Zerspanungstechnik bereithalten, bieten sich als Plattform für solche Anlagen an.

Nach diesem Ansatz lässt sich **das Konzept des flexiblen laserintegrierten Fertigungssystems** für weitere Anwendungsfälle im Bereich der Prototypen, Muster- und Einzelteile sowie Kleinserien weiterentwickeln. In vielen solcher fertigungstechnischen Aufgabenstellungen gibt es je nach Werkstoff, geometrischer Komplexität und funktionalen Eigenschaften der Bauteile nennenswerte Zeit- und damit Kosteneinsparpotenziale durch zusätzlichen Einsatz von etablierten Laserverfahren wie Schweißen, Schneiden, Härten, Umschmelzen, Legieren, Beschichten, Abtragen (Strukturieren) oder Beschriften. Als Plattformen bzw. Handhabungssysteme können dabei jeweils Dreh- oder Fräszentren, umformtechnische Anlagen oder Roboterzellen zum Einsatz kommen, die unter relativ geringem Aufwand mit Bearbeitungsoptiken und Zuführungen von Schutz- und Bearbeitungsgasen sowie Zusatzwerkstoff im Arbeitsraum ausgerüstet werden können. So lassen sich Anlagen realisieren, die

- alle Verfahren für die notwendigen Bearbeitungsschritte in möglichst wenigen Aufspannungen zur Verfügung stellen,
- sowohl geometrische als auch funktionale Eigenschaften (wie zum Beispiel Stoffeigenschaftenänderungen) an den Bauteilen erzeugen können,
- ohne aufwändig vorzubereitende Werkzeuge (zum Beispiel Gussformen) auskommen,
- eine praktisch beliebige Reihenfolge der Bearbeitungsschritte zulassen und
- geringe Umrüstzeiten für hohe Maschinenauslastungen aufweisen.

Natürlich ist es weder notwendig noch zweckmäßig, *alle möglichen* Verfahrensvarianten in einem einzigen Fertigungssystem vorzuhalten. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Handhabbarkeit sollte die Zusammensetzung eines solchen Systems viel mehr auf die Anforderungen einer Produkt- oder Teilefamilie abgestimmt werden, wie sie branchen- oder produktpalettenspezifisch in der fertigungstechnischen Praxis meist anzutreffen ist. Beispiele für solche Teilefamilien sind Wellen, Blechteile oder Gesenke. Dies führt zwangsläufig zu einem **modularen Aufbau** flexibler Fertigungssysteme sowohl hinsichtlich der Maschinen- als auch der Steuerungstechnik, der es erlaubt, ein spezifisches System aus einem **Baukasten vorhandener Funktions- und Steuerungskomponenten** je nach Bedarf zusammenzustellen.

Dieses Baukastenprinzip soll anhand der beispielhaften Realisierung in einer Laboranlage erläutert werden. Sie besteht aus den in **Bild 4.1** skizzierten weitgehend autarken Modulen.

Basiskomponente ist stets eine Werkzeugmaschine für die Spannung und Handhabung der

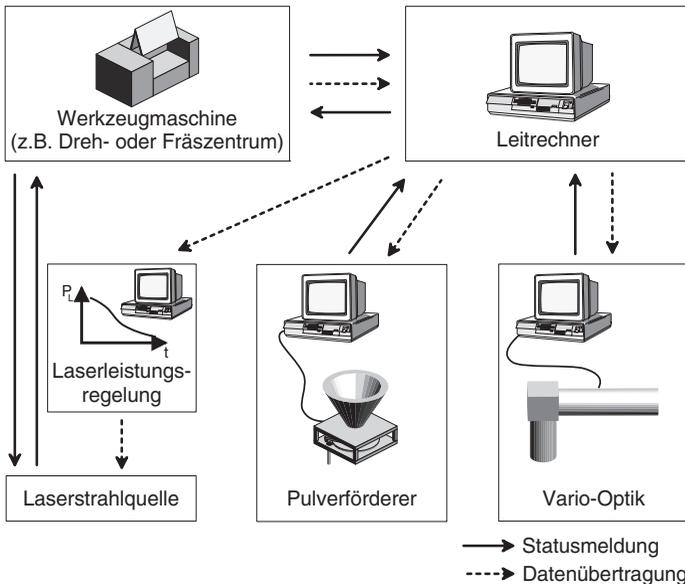


Bild 4.1: Modulkonzept eines beispielhaften Fertigungssystems.

Werkstücke, zum Beispiel ein Dreh- oder Fräszentrum (Kapitel 4.3). Mit ihr verknüpft ist ein Leitrechner, der die untergeordneten Module steuert (Kapitel 4.2). Als Funktionsmodule stehen in der Laboranlage eine variable Laserbearbeitungsoptik (Kapitel 4.5), ein Pulverförderer (Kapitel 4.6) sowie die Laserstrahlquelle (Kapitel 4.4) zur Verfügung. Ergänzt wird das System durch unterschiedliche Sensorsysteme und eine separate Einheit zur Laserleistungsregelung (Kapitel 4.7).

4.1 Modulares Softwarekonzept

Die besondere Eigenschaft der einzelnen Module besteht darin, dass sie als untergeordnete Systeme eine definierte Schnittstelle und – durch jeweils eine eigene Steuereinheit – eine gewisse „Intelligenz“ und weitgehende Selbständigkeit besitzen. Gemäß dem Baukastenprinzip ist das komplexe Gesamtsystem damit in **einfachere Subsysteme** aufgeteilt, was sowohl die Komplexität der einzelnen Steuerprogramme und damit die Fehlerträchtigkeit, als auch die Leistungsanforderungen an die Hardware in Grenzen hält. Ohne auf ein Multi-Tasking-System zurückzugreifen werden die modulinternen Berechnungen, zum Beispiel zur Datenaufbereitung, parallel abgearbeitet.

Für drei Module der realisierten Laboranlage werden als Steuereinheiten handelsübliche Personal Computer verwendet:

- Leitrechner (Kapitel 4.2),
- Optik-Steuerung (Kapitel 4.5.5) und
- Leistungsregelung (Kapitel 4.7.1.6).

Auf aufwändige grafische Bedienungsflächen, flexible Speicherverwaltungsmechanismen und Multi-Tasking-Fähigkeiten, wie sie höhere Betriebssysteme aufweisen, wurde zugunsten der vollen Nutzung der vorhandenen Leistungsressourcen für Berechnungen und Steuerungsabläufe verzichtet. Auf der Basis des Betriebssystems MS-DOS wurde die gesamte Steuersoftware in der Programmiersprache *Borland Turbo Pascal 7.0* implementiert. Sie bietet zum einen den Ansatz der **objektorientierten Programmierung**, bei dem die Trennung zwischen Daten und Programmcode durch die Kapselung in *Objekte* aufgehoben wird. Zum anderen lassen sich Funktionalitäten in abgeschlossene Programmmodule (*Units*) aufteilen, womit auch auf der Software-Seite konsequent der modulare Ansatz umgesetzt werden kann.

Die Steuerprogramme der drei genannten Systemmodule bestehen größtenteils aus den selben Programm-Modulen (**Bild 4.2**):

- Funktionen wie zum Beispiel Bedienerführung, Bildschirmdarstellungen oder Ein- und Ausgaben über die Schnittstellen sind in allgemeinen Modulen implementiert, die in drei Ebenen aufeinander aufbauen.
- Spezifische Funktionen der einzelnen Steuerprogramme sind in speziellen Modulen realisiert, die auf die allgemeinen Modulebenen aufsetzen. Dabei ist die Struktur der Steuerprogramme jedoch stets gleich: Sie bestehen jeweils aus einem Berechnungs-, einem

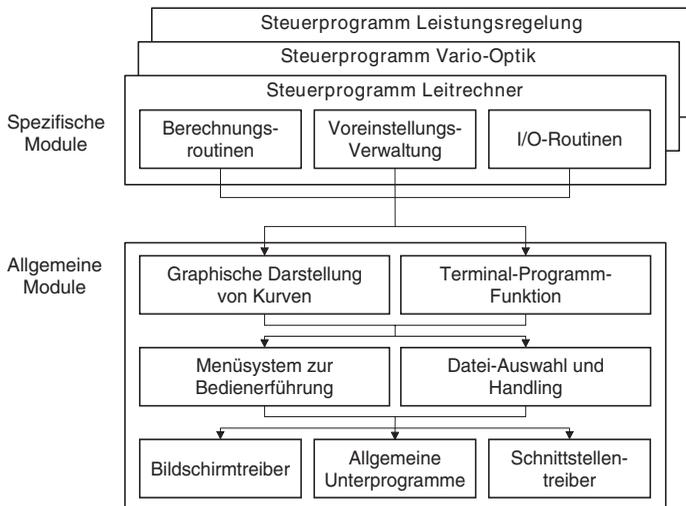


Bild 4.2: Modulkonzept der Steuerungssoftware.

Verwaltungs- und einem I/O-Modul. Insbesondere die letzten beiden davon sind in allen Programmen sehr ähnlich, so dass Teile daraus wiederverwendet werden können.

Der modulare Aufbau der Softwaremodule steigert zum einen die **Effizienz** bei der Erstellung und Pflege, da fast alle Module in den verschiedenen Steuerprogrammen im Fertigungssystem mehrfach verwendet werden; Weiterentwicklungen in einzelnen Modulen kommen allen Steuerprogrammen gleichermaßen zugute. Die Mehrfachverwendung der Programmbausteine wirkt sich zum anderen dank einheitlicher Bedienerschnittstelle positiv auf die **Bedienbarkeit** aus und gewährleistet die **Kompatibilität** der Steuerprogramme untereinander, da sie auf die Schnittstellenfunktionen aus demselben Software-Modul zurückgreifen. Schließlich ist dieses Bausteinkonzept – analog zum Gesamtkonzept des modularen Fertigungssystems – offen gegenüber Erweiterungen für neue Module und Funktionalitäten [179].

4.2 Steuerungs- und Datenkonzept des Leitrechners

Wie Bild 4.1 zeigt, steht der Leitreechner hierarchisch auf einer Stufe mit dem Handhabungssystem und steuert die untergeordneten Module. Auf diese Weise wird nicht nur eine wirksame Entlastung der Werkzeugmaschinen-Steuerung, sondern auch die leichte Anpassbarkeit des modularen Systems an unterschiedlichste Basismaschinen und CNC-Steuerungstypen erreicht. Als Schnittstelle dienen lediglich zwei digitale Spannungssignale, über die ein „Bereit“-Signal zur **Synchronisation der Steuerungen** vor einem Laserbearbeitungszyklus ausgetauscht wird („hand shake“). Mit den untergeordneten Modulen ist der Leitreechner – je nach

Komplexität der zu übertragenden Daten und Signale – über digitale und analoge Spannungssignale oder über die serielle RS232-Schnittstelle gekoppelt [180, 181].

Die Synchronisation zwischen den Modulen ist notwendig, weil auf der CNC-Steuerung der Werkzeugmaschine und dem Leitrechner während der Bauteilbearbeitung **zwei getrennte Programme** ablaufen. An den Synchronisationspunkten warten die beiden Steuerungen bei Bedarf aufeinander, so dass die anschließende Laserbearbeitung parallel gestartet und exakt zwischen den aktiven Modulen abgestimmt durchgeführt wird. In **Bild 4.3** ist ein solcher Bearbeitungsablauf skizziert, wobei zur Verdeutlichung neben Werkzeugmaschine und Leitrechner nur ein weiteres Modul beispielhaft dargestellt ist.

Nach dem Start von Maschinen- und Leitrechnerprogramm werden zunächst funktionell und zeitlich voneinander **unabhängige Arbeitsschritte** ausgeführt. Im Falle der Werkzeugma-

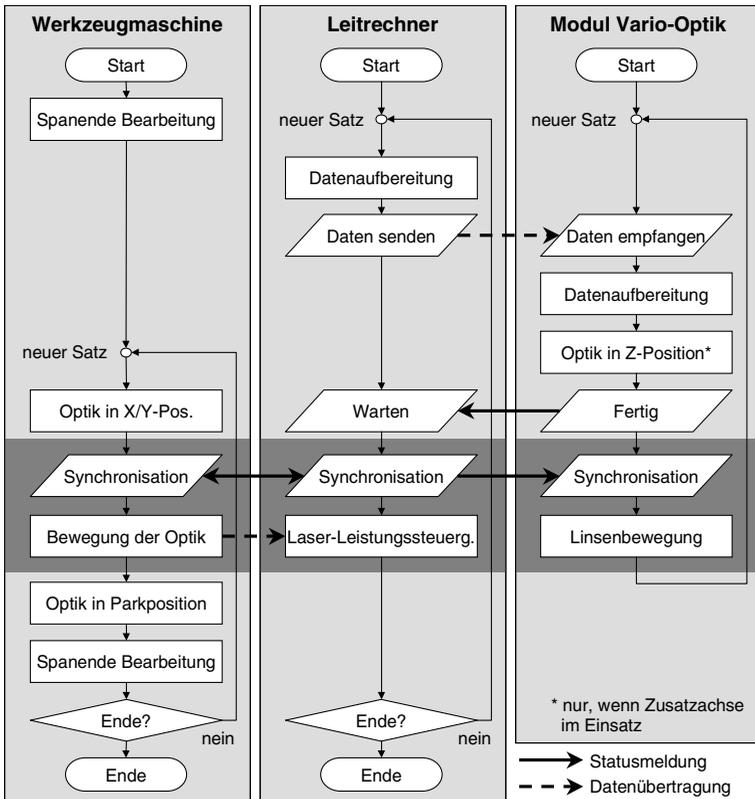


Bild 4.3: Paralleler Ablauf der Programme von Handhabungssystem, Leitrechner und Optik-Modul. Dunkel unterlegt ist der „Hand shake“-Vorgang zur Synchronisierung und der anschließend parallele Ablauf einer Laserbearbeitung.

schine kann das zum Beispiel eine spanende Vorbearbeitung des Rohlings sein, während der Leitrechner bereits die Daten für die erste Laserbearbeitung an die untergeordneten Modulsteuerungen überträgt. Erst wenn beide Steuerungen in ihren jeweiligen Programmabläufen am ersten Synchronisationspunkt angelangt sind, wird die Bearbeitung **von allen Modulen parallel** fortgesetzt (in Bild 4.3 dunkel unterlegt). Danach setzen die Steuerungen wieder unabhängig voneinander ihr jeweiliges Bearbeitungsprogramm fort, so dass auf der Werkzeugmaschine zum Beispiel eine spanende Nachbearbeitung der soeben lasergenerierten Spur erfolgen kann. Dieser Zyklus aus abwechselnd synchronisiertem und unsynchronisiertem Ablauf („Satz“) wird in den Steuerprogrammen so oft wie nötig wiederholt. Die einzelnen untergeordneten Module kehren dabei nach Aufbereitung und Abarbeitung der vom Leitrechner empfangenen Daten stets wieder in den Empfangsmodus für die Daten eines neuen Satzes zurück.

Die Unterteilung der Bearbeitungsaufgabe in Sätze ist lediglich **logischer Natur** und deshalb sehr flexibel: In einem Satz können zum Beispiel eine einzige Spur oder auch eine ganze Lage aus mehreren Spuren generiert oder auch andere Laserbearbeitungsschritte wie Abtragen oder Schweißen durchgeführt werden. Die exakte Abstimmung der Funktionen von Werkzeugmaschine und Leitrechner während der Laserbearbeitung in einem Satz erfolgt zeit- oder positionsgesteuert. Letzteres ist insbesondere für längere Sätze mit umfangreicherer Laserbearbeitung aus Genauigkeitsgründen vorzuziehen. Ermöglicht wird es durch zusätzliche Kopplung der Handhabungsmaschine an den Leitrechner über ein **Positionssignal**, das direkt vom Positionsmesssystem der Maschine oder von zusätzlichen Messsystemen wie zum Beispiel von einem separaten Inkrementaldrehgeber an der Spindel eines Drehzentrums stammt.

Die Programmierung des Leitrechners erfolgt – anders als nach DIN 66025 bei Werkzeugmaschinen üblich – als einfache Beschreibung der Verläufe der Steuergrößen. Die Änderung einer Steuergröße wird dabei durch den Startzeitpunkt t_S (bzw. als Äquivalent die Startposition x_S oder der Spindel-Startwinkel γ_S bei entsprechender Kopplung), den Endwert der Steuergröße w und der Dauer der Änderung Δt (bzw. Δx oder $\Delta \gamma$) beschrieben. Wie in **Bild 4.4** skizziert, lässt sich auf diese Weise jeder Signalverlauf mit linearen Änderungen darstellen. Nichtlineare Verläufe der Steuersignale werden aus entsprechenden Teilstücken zusammengesetzt.

Die Syntax eines Leitrechner-Satzes ist in **Bild 4.5** dargestellt. Ein Satz besteht aus beliebig vielen Anweisungen; das Satzende wird mit einem Doppelkreuz (§) gekennzeichnet. Jede Anweisung bezieht sich genau auf ein Modul, das jeweils durch den führenden Buchstaben gekennzeichnet ist:

- Laserleistung (L): Als Steuergröße wird im ungeregelten Betrieb die Ausgangsleistung in Watt angegeben. Grundlage ist eine vorangegangene Kalibrierung, die dem analogen Ausgangssignal des Leitrechners einen Leistungswert zuordnet, der aus einer entsprechenden Messung stammt. Im geregelten Betrieb, in dem das Regler-Modul (Kapitel 4.4) zwischen Leitrechner und Laserstrahlquelle geschaltet ist (vgl. Bild 4.1), wird der Sollwert für den Regler in mV angegeben.
- Variooptik (O): Steuergröße ist der Sollwert des Strahldurchmessers auf dem Werkstück in mm. Zusätzlich wird diesem Modul auch eine Höheninformation (C) geliefert, um beim Einsatz einer Zusatzachse die z-Position der Optik zu steuern (Kapitel 4.5).

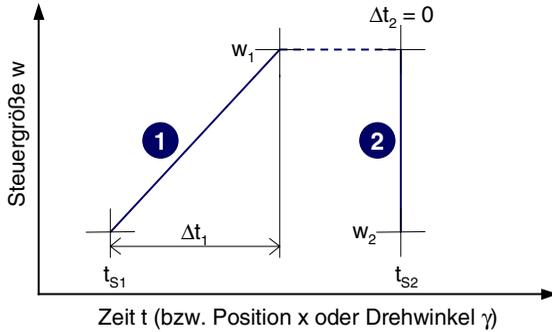


Bild 4.4: Beschreibung einer Rampe (1) und einer Sprungfunktion (2) im Leitrechnerprogramm durch Startzeitpunkt t_S (bzw. Startposition x_S oder Startdrehwinkel γ_S), Endwert der Steuergröße w und Dauer Δt (bzw. Δx oder $\Delta \gamma$). Zwischen zwei Befehlen wird der aktuelle Wert der Steuergröße gehalten (gestrichelt).

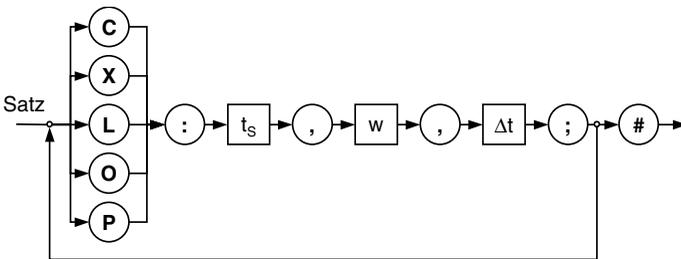


Bild 4.5: Syntax eines Satzes zur Programmierung des Fertigungssystems über den Leitrechner.

- Pulverförderer (P): Der Pulvermassenstrom wird in g/min programmiert. Auch hier ist die vorangegangene Kalibrierung des Moduls Voraussetzung, da der geförderte Pulvermassenstrom von den gerätetechnischen Einstellungen und dem spezifischen Gewicht des verwendeten Zusatzwerkstoffs abhängt (Kapitel 4.6).
- Zusätzlich lassen sich vom Leitrechner auch noch Sonderfunktionen (X) über digitale Signale ausführen. Insbesondere für **Messaufgaben** wie zum Beispiel die in Kapitel 3.3 beschriebenen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen können so die notwendigen Triggersignale erzeugt werden.

Vor der Bearbeitung eines jeden Satzes werden die Steueranweisungen im Leitrechner aufbereitet. Neben dem Sortieren der Anweisungen nach ihrem Startzeitpunkt bzw. ihrer Startposition werden insbesondere die für jedes Modul typischen voreingestellten **spezifischen Vorlaufzeiten** bzw. Vorlaufpositionen berechnet. So müssen zum Beispiel alle Befehle zur Steuerung des Pulverförderers um die typische Reaktionszeit zwischen Signaleingang und Änderung des geförderten Pulvermassenstroms in der Wechselwirkungszone früher abgesetzt werden (siehe

Kapitel 3.2.3). Die jeweils spezifischen Verzögerungszeiten für jedes der eingesetzten Module sind als Anlagencharakteristik in den Voreinstellungen des Leitrechners hinterlegt. In einem Compilierungsvorgang werden die linearen Signalverläufe schließlich mit einer zeitlichen Auflösung von 5 ms diskretisiert und an die Steuerungen der Module übertragen. Hier werden – je nach Bedarf – weitere Berechnungen zur Vorbereitung des Bearbeitungslaufes durchgeführt, zum Beispiel die Berechnung der notwendigen Verstellgeschwindigkeiten der Linsen innerhalb der Vario-Optik (Kapitel 4.5).

4.3 Handhabungssystem

Das Konzept des modularen Fertigungssystem wurde im Labormaßstab mit zwei verschiedenen Handhabungsmaschinen realisiert, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

4.3.1 Drehzentrum

Als Handhabungsmaschine zur Herstellung von Rotationsteilen diente ein fünfschiger CNC-gesteuerter Einspindel-Drehautomat *Index GS30* mit zwei unabhängig voneinander steuerbaren Kreuzschlitten mit je einem Werkzeugwechselrevolver. Die Spindel verfügt über Hohlspannzylinder für Zangen- und Futterspannung und kann als C-Achse definierte Winkelstellungen anfahren. Die Maschine ist mit einer CNC-Steuerung vom Typ *Index C 200* ausgestattet. **Bild 4.6** zeigt den Blick in den Arbeitsraum: Der linke Werkzeugwechselrevolver ist mit Drehmeißeln bestückt, während der rechte durch die daran montierte Zusatzachse verdeckt wird, die die Bearbeitungsoptik trägt.

4.3.2 Fräszentrum

Eine HSC-Fräszentrum vom Typ *Klink HSC 60* mit drei kartesischen Achsen und *Aradex*-Steuerung kam ebenfalls als Handhabungssystem zum Einsatz. **Bild 4.7** zeigt zwei Ansichten des Arbeitsraums, in der Bearbeitungsoptik und Spindel parallel über einem Maschinenschraubstock zur Spannung der Werkstücke angeordnet sind.

4.4 Laserstrahlquelle

Zur Integration des Werkzeugs Laser in Werkzeugmaschinen eignen sich besonders solche Laserquellen, deren Wellenlänge die Leistungsübertragung durch **Glasfasern** zum Einsatzort erlaubt [7, 149]. Für die Untersuchungen zur vorliegenden Arbeit kamen lampengepumpte Nd:YAG-Festkörperlaser mit 2 und 4 kW Strahlleistung zum Einsatz. Die Strahlleitung erfolgte dabei jeweils durch Stufenindexfasern mit einem Faserkerndurchmesser von 0,6 mm.

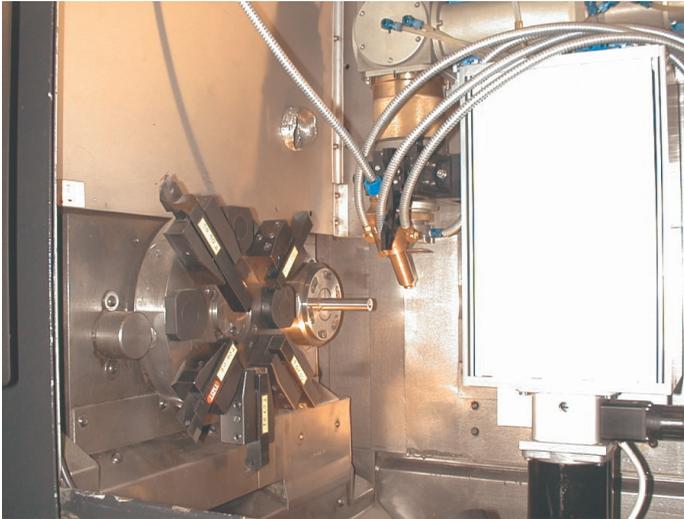


Bild 4.6: Modulares Fertigungssystem auf der Basis eines Drehzentrums. Links neben der Spindel befindet sich ein Werkzeugwechselrevolver mit verschiedenen Drehwerkzeugen, rechts die Zusatzachse zur Höhenverstellung der Bearbeitungsoptik.

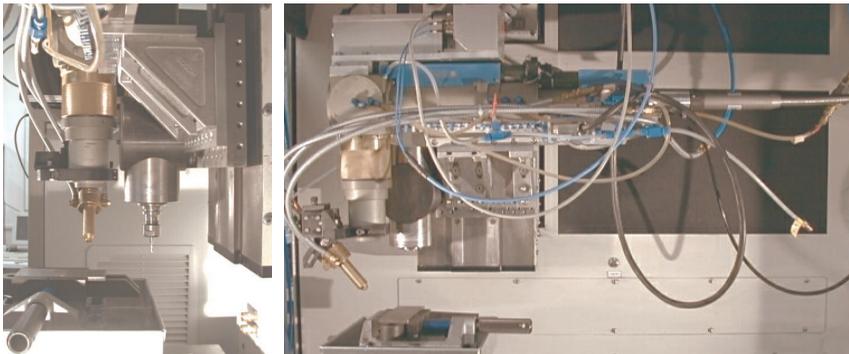


Bild 4.7: Modulares Fertigungssystem auf der Basis einer HSC-Fräsmaschine. Frässpindel und Bearbeitungsoptik sind nebeneinander angeordnet und werden gemeinsam verfahren.

Prinzipiell ist auch die Verwendung von **fasergekoppelten Diodenlasern** möglich; der erforderliche Leistungsbereich für das Lasergenerieren in den vorliegenden Spurgeometrien reicht dabei bis ca. 1 kW.

Die **Steuerung der Laserleistung** erfolgt über ein analoges Spannungssignal entweder direkt vom Leitrechner (vgl. Bild 4.1) oder von einer Reglereinheit aus, welche vom Leitrechner mit dem Sollwert und von einem entsprechendem Sensor mit einem Istwert versorgt wird (Kapitel 4.7.1). In jedem Falle jedoch stammen die Steuerbefehle zum Ein- und Ausschalten des Laserstrahls aus Sicherheitsgründen von der CNC-Steuerung der Handhabungsmaschine; die Laserstrahlquelle kann so zuverlässig in den bestehenden Sicherheits- und Not-Aus-Kreis der Maschine eingebunden werden.

4.5 Variable Laserbearbeitungsoptik

4.5.1 Anforderungen

Für die steuerbare stetige Veränderung des Strahldurchmessers auf dem Werkstück zur Erzeugung variabler Spurbreiten während des Lasergenerierens ist eine entsprechende Strahlformungseinrichtung Voraussetzung. An den Entwurf einer solchen „variablen“ Bearbeitungsoptik wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Der Bereich des steuerbaren Abbildungsmaßstabs (Verhältnis von Bildgröße zu Objektive) sollte **stufenlos von 1:1 bis 4:1** variiert werden können. Unter Verwendung einer Standard-Glasfaser mit 0,6 mm Kerndurchmesser liegt der nutzbare Strahldurchmesser auf dem Werkstück somit zwischen 0,6 und 2,4 mm.
- Die von der Strahlleitung durch die Glasfaser herrührende **homogene Leistungsdichteverteilung** am Glasfaserende wirkt sich positiv auf den Laserprozess aus (siehe Kapitel 2.3.1.3) und sollte deshalb bei Variation des Strahldurchmessers durch eine **qualitativ hochwertige Abbildung** der Glasfaserendfläche auf das Werkstück für den Bearbeitungsprozess erhalten bleiben.
- Die Bildebene, also der Arbeitspunkt auf der Werkstückoberfläche, sollte sich auch während der Verstellung des Abbildungsmaßstabs immer in konstanter z-Position befinden. Dies sollte einen stets **konstanten Arbeitsabstand** zwischen Bearbeitungsoptik und Werkstückoberfläche gewährleisten.
- Die Bearbeitungsoptik sollte für **Laserleistungen bis zu 4 kW** ausgelegt werden, ohne dass die Gefahr von thermischen Einflüssen oder gar Beschädigungen besteht.
- Für die einfache Integration in Werkzeugmaschinen war eine Konstruktion als **kompakte Einheit** notwendig.
- Ein zuverlässiger **Schutz der optischen Elemente** gegen Materialspritzer und Verschmutzung durch Pulverpartikel sollte gewährleistet sein.

Allen Anforderungen gleichermaßen gerecht zu werden ist nicht möglich: Einerseits verlangt eine gute Integrierbarkeit in den Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine möglichst geringe Ab-

messungen der Konstruktion und damit einen geringen Abstand von Glasfaserende (Objektebene) zu Werkstückoberfläche (Bildebene). Gleichzeitig muss der Abstand des letzten optischen Elements eine möglichst große Distanz von der Werkstückoberfläche aufweisen, um einen komfortablen Arbeitsabstand zu gewährleisten, in dem die Pulverdüse angeordnet werden kann. Kompakte Maße der Konstruktion werden begünstigt, wenn die optischen Elemente innerhalb der Bearbeitungsoptik einen möglichst kleinen Abstand e einnehmen. Dies erfordert die Verwendung von Linsen kleiner Brennweiten f . Demgegenüber steht die Forderung nach einer möglichst guten optischen Abbildungsqualität, was wiederum für große Brennweiten f und kleine Strahldurchmesser auf den Linsen D spricht. Schutz vor thermischer Beschädigung der Linsen aufgrund von zu hoher Leistungsdichte wiederum macht große Strahldurchmesser D und damit einen großen Gesamtabstand der optischen Elemente e notwendig (**Bild 4.8**). Bei der Auslegung des optischen Konzepts mussten also Kompromisse gefunden werden.

Aus den Anforderungen nach einer hochwertigen Abbildung bei gleichzeitig konstantem Arbeitsabstand wird deutlich, dass die Strahldurchmesservariation nicht durch Defokussierung wie in [182] realisiert werden kann. Vielmehr ist ein aufwändigeres **optisches System mit beweglichen Elementen**, ähnlich eines Zoomobjektivs in der Photographie, notwendig.

4.5.2 Optisches Konzept

Die vergleichende Untersuchung verschiedener möglicher optischer Konzepte hinsichtlich der genannten Anforderungen und der konstruktiven Realisierbarkeit ergab wesentliche Vorteile für ein **Konzept aus drei positiv wirkenden Linsen** [184]. Die Variation des Abbildungsmaßstabs erfolgt dabei allein durch Bewegung der ersten Linse entlang der optischen Achse. Mit der zweiten, ebenfalls beweglichen Linse wird das Bild der ersten als Objekt aufgenommen und ins Unendliche abgebildet. Die dritte Linse schließlich bündelt den kollimierten Strahlengang in ihrer Brennebene. Durch die stets gleiche Position dieser letzten Linse im Strahlengang bleibt der Ort des Arbeitspunkts für alle unterschiedlichen Abbildungsmaßstäbe

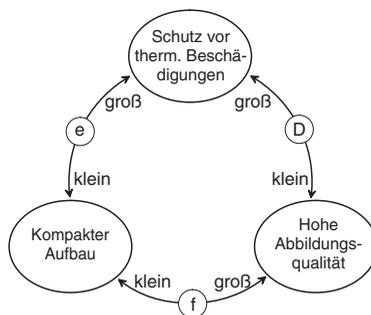


Bild 4.8: Gegengesetzte Anforderungen an die Bearbeitungsoptik. Die wesentlichen beeinflussenden Größen sind Abstand zwischen erstem und letztem optischen Element e , Strahldurchmesser auf den Linsen D und Brennweiten f [183].

konstant. Das Prinzip dieses optischen Konzepts zeigt **Bild 4.9**: Aufgetragen sind die Verfahrkurven von Linse 1 und 2 für unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe. Für vier diskrete Vergrößerungen sind die Linsenpositionen im ungefalteten Strahlengang eingezeichnet.

Diese Variante besteht gegenüber anderen möglichen optischen Konzepten durch eine **Reihe von Vorteilen** bezüglich der optischen Eigenschaften und der konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten [184]. Im quantitativen Vergleich der Quer- und Längsabberationen verfügt die dreilinsige Variante über eine verhältnismäßig gute Abbildungsqualität. Eine zusätzliche Verbesserung wird erzielt, indem die erste Linse als Doublett aus zwei identischen Plankonvexlinsen ausgeführt wird, so dass sich die Brechung auf vier anstatt zwei Oberflächen aufteilt.

Ferner besteht die Möglichkeit, Standardlinsen aus den üblichen Lieferprogrammen von Herstellern optischer Komponenten zu verwenden, wobei die Linsen 2 und 3 identisch ausgeführt werden können. Der kollimierte Teil des Strahlengangs ist nicht nur für eine Strahlfaltung prädestiniert, sondern er erlaubt durch die Variation seiner Länge auch eine einfache Realisierung einer Bildlage- bzw. Arbeitspunktverstellung. Schließlich weisen die beiden beweglichen Linsen über ihren Verstellweg von 31 und 125 mm relativ einfache Bewegungskurven ohne Umkehrpunkte und Überschneidungen auf.

Die Grundlage für die Auslegung und die iterative Optimierung der Linsen waren folgende auf Erfahrung basierende Voraussetzungen:

- Der **minimale Strahldurchmesser D auf den Linsen** sollte den Wert von 7 mm nicht

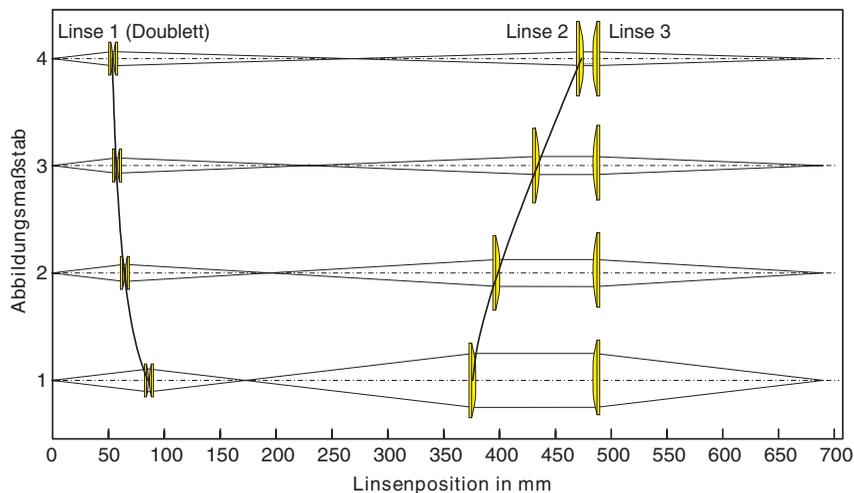


Bild 4.9: Linsenpositionen und ungefalteter Strahlengang im Inneren der Bearbeitungsoptik bei verschiedenen Abbildungsmaßstäben [183]. Das Glasfaserende (Objektbene) befindet sich bei Position 0 mm, der Arbeitspunkt (Bildebene) bei Position 690 mm.

unterschreiten, um Beschädigungen durch zu hohe Leistungsdichten sicher auszuschließen.

- Alle **Aperturen** sollten mindestens den 1,3-fachen Durchmesser des an der jeweiligen Stelle maximal auftretenden Strahldurchmessers aufweisen, um unerwünschte Beugungseffekte in einer vertretbaren Größe zu halten.
- Die Linsen sollen aus einem **Werkstoff mit möglichst hohem Brechungsindex** bestehen, um die Krümmungsradien der Linsenoberflächen und damit die Einflüsse durch Abberation möglichst klein zu halten.

Mit den in **Tabelle 4.1** gewählten Linsen ergibt sich ein Abstand von Objektebene (Glasfaserende) zu Bildebene (Werkstückoberfläche) von 690 mm. Durch die einfache Umsetzung einer Strahlfaltung im kollimierten Teil des Strahlengangs lässt sich die Größe der Bearbeitungsoptik dennoch so ausführen, dass eine Integration in die Arbeiträume der meisten Werkzeugmaschinen möglich ist.

Für die exakte Einstellung des Abbildungsmaßstabs werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit des **Positionierungssystems der Linsen** gestellt: Bei einer Positionierungsungenauigkeit der maßstabsbestimmenden Linse 1 von $\pm 0,1$ mm ergibt sich eine Abweichung des Objekt-Bild-Abstands (Verschiebung des Arbeitspunkts) von bis zu $\pm 1,6$ mm und eine Maßstabsabweichung von bis zu $\pm 0,04$.

4.5.3 Konstruktive Umsetzung

Die Umsetzung des optischen Konzepts wurden mit der in **Bild 4.10** dargestellten Konstruktion realisiert. Die Hauptabmessungen dieser aus zusammengeflanschten rohrförmigen Elementen bestehenden Bearbeitungsoptik betragen inklusive Faserstecker ca. 680 mm \times 320 mm \times 100 mm bei einem Gewicht von ca. 8 kg. Die Strahlzuführung erfolgt über eine Glasfaser der Firma *Trumpf* (vormals *Haas*). Der firmenübliche Faserstecker *LLK-R* (1) passt zu einer

Linse	1	2 und 3
Typ	Doublett aus zwei Plankonvexlinsen	Plankonvexlinse
Werkstoff	Quarzglas	
Brechungsindex $n_{1064 \text{ nm}}$	1,4498	
Brennweite f	42,75 mm (85,0 ^{+1,0} mm) ^a	204,0 ^{+2,0} mm
Durchmesser D_L	22,4 mm	50,8 mm
Scheiteldicke d_s	8,0 mm (3,5 ^{+0,1} mm) ^a	6,0 ^{+0,1} mm
Hauptebenenabstand $\overline{HH'}$	2,2 mm (1,1 mm) ^a	1,9 mm

^aDoublett: Werte der Einzellinsen in Klammern.

Tabelle 4.1: Daten der verwendeten Linsen laut Hersteller [184].

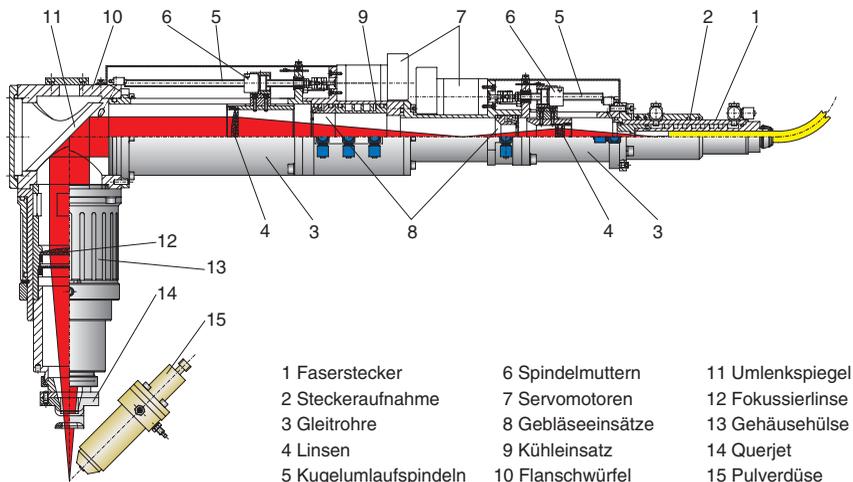


Bild 4.10: Schnitt durch die variable Bearbeitungsoptik mit Querjet und Pulverdüse. Nähere Erläuterungen zur Konstruktion im Text.

entsprechenden Steckeraufnahme (2), die aufgrund des geringen Abstandes von der Faserendfläche zur ersten Linse gegenüber dem Originalteil modifiziert werden musste. Der Winkel und die axiale Position des Glasfaserendes kann durch Zug- und Druckschrauben im Anschlussflansch justiert werden.

Zwei Gleitrohre (3) sind die Führungen der axial beweglichen, in Kolben gelagerten Linsen (4). Die verschleißarmen Reibpaarungen aus hartcoatiertem Aluminium und Messing laufen dabei trocken, um Verschmutzungen der Linsen durch Schmierstoffe auszuschließen. Zwischen Linsen und Kolben sowie zwischen Kolben und Gleitrohren sind geeignete Passungen gewählt, womit Wärmedehnungen wirksam begegnet werden kann. Die Kraftübertragung zur Bewegung der Kolben erfolgt durch Längsnuten über außerhalb der Gleitrohre liegende Antriebe. Diese bestehen aus je einer Kugelumlaufspindel (5) von 84 und 170 mm Länge, die über je zwei gekapselte Miniaturkugellager in O-Anordnung einseitig spielfrei gelagert ist (Festlager). Um Platz zu sparen, dienen die Spindelmuttern (6) selbst als Loslager. Die Antriebe werden von je einem Servomotor (7) mit Digital-Encoder sowie diversen elektrischen Schaltern zur Detektion von Referenz- und Endpositionen der Kolben vervollständigt.

Besondere Vorkehrungen wurden getroffen, um die Optik gegen **Verschmutzungen durch kleinste Partikel** zu schützen. Die Linsen werden über Gebläseeinsätze (8) und -bohrungen mit einem kontinuierlichem Luftstrom angeblasen, um das Festsetzen von Staubpartikeln zu vermeiden und eine gewisse Kühlwirkung zu erzeugen. Dadurch entsteht im Gehäuse ein geringer Überdruck und ein Luftstrom durch die Längsnuten in den Gleitrohren nach außen, was ein Eindringen von Partikeln in das Gehäuse wirksam verhindert.

Die während des Betriebs auftretende Wärme, zum Beispiel durch absorbierte Streustrahlung,

wird über drei wassergekühlte Bereiche, die als **Wärmesenken** dienen, aus dem Gehäuse abgeführt. Diese sind der Faserstecker (1), ein Kühleinsatz (9) in der Gehäusemitte sowie ein Kühldeckel auf dem Flanschwürfel (10), der sich an das große Gleitrohr anschließt. Hier wird der kollimierte Strahl durch einen elliptischen Planspiegel (11) um 90° umgelenkt. Auf der Oberseite des Flanschwürfels befindet sich eine Öffnung für die Prozessüberwachung, an der die Sensorsysteme angebaut werden (siehe Kapitel 4.7).

Die Fokussierlinse (12) und das darunter angeordnete Schutzglas befinden sich wiederum in einem verschiebbaren Kolben, der durch Drehen der äußeren Gehäusehülse (13) in der Höhe verstellbar ist. Dadurch lässt sich der **Arbeitsabstand** (die Fokuslage) in einem Bereich über ca. 50 mm manuell einstellen. Der Kolben selbst und die daran angebauten Teile wie Querjet (14) und Pulverdüse (15) werden dabei nicht verdreht.

Beim **Querjet** (14) handelt es sich um eine spezielle Flachstrahldüse, mit der ein starker Luftstrom quer zur Laserstrahlachse erzeugt wird. Mit dieser bereits beim Laserschweißen bewährten Einrichtung werden von der Wechselwirkungszone aus aufsteigende Partikel und Materialspritzer in ihrer Bewegung zur Seite abgelenkt und optische Elemente vor Verschmutzung geschützt. Eine genaue Beschreibung des Querjets findet sich in [185].

4.5.4 Justage und Kalibrierung

Durch die mechanische Entkopplung der beiden beweglichen Linsen in der Bearbeitungsoptik lassen sich unvermeidliche Fertigungstoleranzen der optischen Elemente und der Rohrkonstruktion ausgleichen, indem die in Bild 4.9 gezeigten theoretischen Kurvenbahnen angepasst und in das Steuerprogramm der Bearbeitungsoptik übernommen werden. Diese Anpassung erfordert eine relativ aufwändige Justage- und Kalibrierungsprozedur der Optik, die mit Laserstrahlung der Bearbeitungswellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$ durchgeführt werden muss und bei der die für einen bestimmten Abbildungsmaßstab optimalen Positionen der Linsen 1 und 2 ermittelt werden. Zwei Schritte sind hierzu notwendig:

1. **Ermittlung der Brennebene der Fokussierlinse.** Da alle folgenden Messungen stets im Arbeitspunkt vorgenommen werden, ist die Kenntnis der genauen Lage der Brennebene unabdingbar. Die Brennebene der Fokussierlinse wird exakt bestimmt, indem die Verbindung zwischen senkrechtem Tubus und Flanschwürfel getrennt wird und der Tubus parallel zur optischen Achse verschoben wird, während der resultierende Fokusedurchmesser in verschiedenen Abständen von der Fokussierlinse gemessen wird. Der Arbeitspunkt findet sich in der Ebene, in der sich alle parallel verschobenen Strahlen treffen, d.h. in der sich stets der kleinste Fokusedurchmesser messen lässt.
2. **Ermittlung von optimalen Linsenpositionspaaren.** Ein bestimmter Abbildungsmaßstab mit hoher Abbildungsqualität wird durch eine optimale Positionierung der beiden beweglichen Linsen zueinander festgelegt. Diese optimalen Positionen (je ein Linsenpositionspaar) werden ermittelt, indem zunächst Linse 1 an einer beliebigen Position fixiert wird und die zugehörige Position für Linse 2 sukzessive gesucht wird. Die optimale Position für Linse 2 ist gefunden, wenn die Laserstrahlung hinter ihr kollimiert

ist und damit der minimale Fokusedurchmesser in der Brennebene der Fokussierlinse gemessen werden kann.

Die ermittelten Linsenpositionspaare werden über die gemessenen Strahldurchmesser in der Brennebene der Fokussierlinse diskreten Abbildungsmaßstäben zugeordnet und als Stützstellen der Verfahrkurven in das Steuerprogramm für die Linsenbewegungen eingegeben.

4.5.5 Steuerung

Durch ihre eigene Steuerungseinheit auf PC-Basis stellt die Bearbeitungsoptik ein autarkes Modul dar, das entweder manuell bedient oder an den Leitreechner des modularen Fertigungssystems (Kapitel 4.2) angekoppelt werden kann. Die wichtigste steuerbare Funktion besteht im programmierten **Abfahren definierter Linsenbewegungen** und damit der stetigen Variation des Laserstrahldurchmessers auf dem Werkstück. Neben den Servomotoren zur Linsenverstellung kann zusätzlich der Schrittmotor einer separaten Zusatzachse angesteuert werden: Auch beim Einsatz in Werkzeugmaschinen ohne eigene Z-Achse (zum Beispiel das in Kapitel 4.3.1 vorgestellte Drehzentrum in Bild 4.6) kann so die Ebene des Arbeitspunkts durch Höhenverstellung der gesamten Bearbeitungsoptik dem zunehmenden Materialauftrag nachgeführt werden [186]. Weiterhin unterstützt das Steuerprogramm die Justage und Kalibrierung der Bearbeitungsoptik optimal durch einen entsprechenden Programm-Modus.

Das Steuerprogramm greift konsequent auf die in Kapitel 4.1 vorgestellten Softwaremodule des Systems zurück. Die Ankopplung an den Leitreechner des modularen Systemkonzepts erfolgt über die serielle Schnittstelle. Vor einem Laserbearbeitungszyklus empfängt die Steuerung der Bearbeitungsoptik alle Daten über die für die bevorstehende Bearbeitung erforderlichen Strahldurchmesser-Variationen und berechnet die Startpositionen der Linsen sowie die notwendigen Verfahrgeschwindigkeiten. Nach dem Startsignal vom Leitreechner zu Beginn des Bearbeitungszyklus werden die Daten so abgearbeitet, dass die Linsenbewegungen synchron zum Bearbeitungsprozess erfolgen. Danach schaltet das Steuerprogramm wieder in den Empfangsmodus für die Daten des nächsten Bearbeitungsschritts (vgl. Bild 4.3).

4.5.6 Messwerte

Bild 4.11 zeigt die in den Kalibrierungsmessungen ermittelten Linsenpositionen im Vergleich zu den theoretischen Verfahrkurven auf der Basis der Auslegungsberechnungen. Die Abweichungen kommen durch zum Teil erhebliche Toleranzen der Linsennennweiten zustande: Linse 2 weist beispielsweise im Gegensatz zur Auslegungsbrennweite von $f = 204$ mm eine reale Brennweite von 199,8 mm bei einer Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm auf.

Die Strahlkaustiken wurden bei unterschiedlich eingestellten Abbildungsmaßstäben mittels eines Messgeräts *FocusMonitor* [187] vermessen; die Ergebnisse zeigt **Bild 4.12**. Die angestrebte Spreizung des Abbildungsmaßstabes von 1:1 bis 4:1 wird in der Praxis nahezu erreicht. Der **nutzbare Laserstrahldurchmesser** auf dem Werkstück liegt im Bereich von

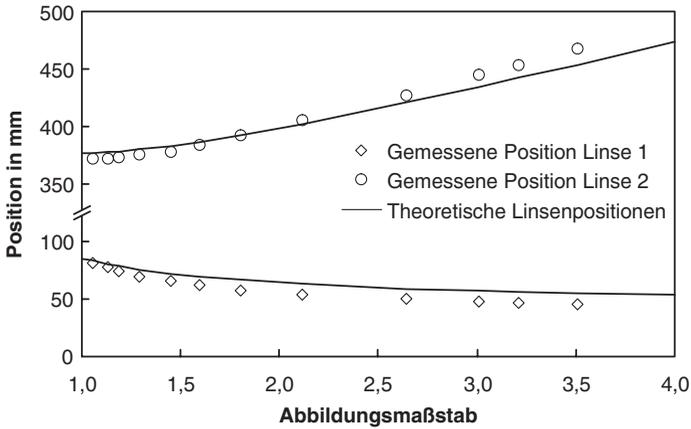


Bild 4.11: Vergleich der theoretischen und der gemessenen einzustellenden optimalen Linsenpositionen.

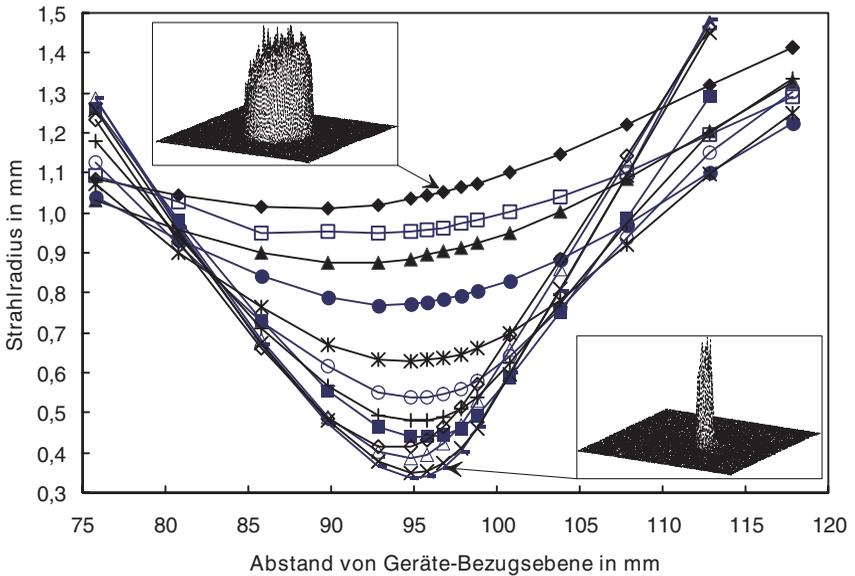


Bild 4.12: Kautistiken des Laserstrahls nach der Bearbeitungsoptik und Leistungsdichteverteilungen in der Brennebene bei verschiedenen Einstellungen des Abbildungsmaßstabs.

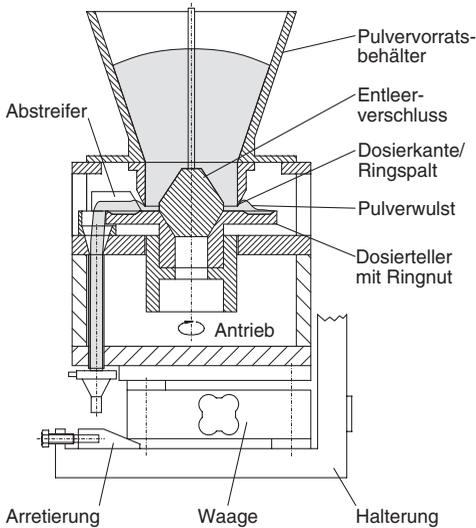


Bild 4.14: Schnittzeichnung des IFSW-Pulverförderers [12] und Außenansicht.

indem Pulver aus dem Vorratsbehälter durch den Ringspalt auf den Dosierteller nachrieselt. Die Fördermenge, die der Abstreifer kontinuierlich erfasst und über die Kante des Fördertellers dem System entnimmt, hängt von der Größe des Ringspalts und der Drehzahl des Tellers ab. Erst nach dem Abstreifer wird dem Pulverstrom im injektorähnlichen Ablauftrichter das Transportgas beigemischt.

Die Förderkonstanz des Geräts ist für Prozesszeiten von mehr als 60 s dadurch optimiert, dass die geförderte Pulvermasse permanent gemessen und für die Drehzahlregelung des Fördertellers herangezogen wird. Durch seine Kompaktheit und sein geringes Eigengewicht ist es möglich, das Gerät komplett auf einer Wägezelle zu lagern, die den Gewichtsverlust des Pulvervorrats mit einer Auflösung von 50 bis 100 mg registriert. Die dazu notwendige mechanische Entkopplung des Transportschlauchs erfolgt zwischen Dosierteller und Ablauftrichter. Details zu Gerät und Regelmechanismus finden sich in [12, 158, 159].

Die Pulvervor- und -nachlaufzeiten hängen im Wesentlichen von der Länge des Transportschlauchs zwischen Förderer und Pulverdüse ab. Durch seine geringe Baugröße kann das Gerät jedoch stets in unmittelbarer Nähe oberhalb des Bearbeitungsbereichs der eingesetzten Werkzeugmaschinen platziert werden, so dass die Schlauchlängen 60 cm und damit die Vor- und -nachlaufzeiten des Pulverstroms 10 s nicht überschreiten.

In den Versuchen zu dieser Arbeit zeichnete sich der Pulverförderer insbesondere durch folgende **Eigenschaften** aus:

- Hohe Kurzzeit- (d.h. keine Pulsation des Pulvermassenstroms) und Langzeitkonstanz der Fördermenge;

- großer Bereich einstellbarer Förderraten \dot{m}_P zwischen 0 und 150 g/min (für Eisenbasispulver);
- geringer notwendiger Transportgasstrom \dot{V}_T unabhängig vom geförderten Pulvermassenstrom; die Partikelgeschwindigkeit am Düsenaustritt ist dadurch gering und der Anteil ungenutzt abprallender Partikel bleibt minimal.

4.6.2 Steuerung

Der Pulverförderer verfügt über eine PC-basierte Steuerung, die im Vergleich zu dem in [12] geschilderten Stand sowohl hard- als auch softwaretechnisch weiterentwickelt wurde. Neben der manuellen Bedienbarkeit wurde besonderes Augenmerk auf eine einfache und zuverlässige Koppelbarkeit mit CNC-Steuerungen von Werkzeugmaschinen gelegt. Eine wichtige Funktion der Steuerung stellt hier die **Kalibrierung** dar: Abhängig von der Größe des Ringspalts, der Position des Abstreifers sowie der Körnung und des spezifischen Gewichts des verwendeten Zusatzwerkstoffs wird bei einer bestimmten Drehzahl des Fördertellers ein gewisser Pulvermassenstrom \dot{m}_P gefördert. Bei der Kalibrierung werden nacheinander und stufenweise erhöhte konstante Drehzahlen des Fördertellers gefahren und die resultierenden Pulverfördereraten aufgezeichnet. Dank der integrierten Wägezelle läuft diese Kalibrierungsprozedur vollautomatisch ab. Anhand der aufgezeichneten Kalibrierkurve berechnet die Steuerung die passende Tellerdrehzahl für jeden gewünschten Pulvermassenstrom.

Die Ankopplung an den Leitrechner des modularen Fertigungssystems oder an die CNC-Steuerung einer Werkzeugmaschine erfolgt über ein analoges Spannungssignal; die gewünschte absolute Pulverförderer rate kann nach einer Kalibrierung für jegliche Pulverarten und momentane Ringspalt- und Abstreifereinstellung in g/min abgerufen werden. Zusätzlich wird der Pulverförderer durch ein digitales Spannungssignal gestartet und gestoppt.

4.6.3 Pulverdüse

Über einen antistatischen Schlauch mit einem Innendurchmesser von ca. 3 mm wird der Pulverstrom zur Pulverdüse geleitet. In den Untersuchungen zu dieser Arbeit kam stets eine wassergekühlte Pulverdüse zur **unidirektionalen Pulverzufuhr** zum Einsatz (siehe auch Kapitel 3.2.4). Eine koaxial zur Düsenöffnung angeordnete Schutzgaszufuhr erhöht durch ihre bündelnde Wirkung auf den Pulverstrahl den maximalen Abstand zwischen Düsenöffnung und Werkstück. Die Wasserkühlung verhindert thermische Beschädigungen der Düsen Spitze durch reflektierte Laserleistung und stellt eine wirksame Sicherheitsreserve für den zuverlässigen Betrieb der Anlage auch über längere Bearbeitungszeiten dar.

Die genaue Justierung des Pulverauftreffpunkts ist, wie in Kapitel 2.3.2.4 aufgezeigt, wesentlich für die Qualität und die Genauigkeit des Materialauftrags. Die in **Bild 4.15** gezeigte Halterung ermöglicht neben der stufenlosen Voreinstellung und Fixierung des Pulverdüsenswinkels α_P die genaue Justage der Düsenposition über Mikro-Verschiebetische in allen drei Raumrichtungen. Da die Düse direkt an der Bearbeitungsoptik befestigt ist und bei wachsendem

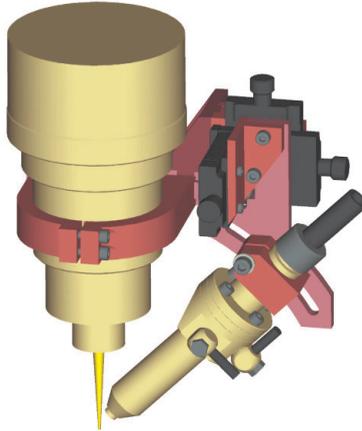


Bild 4.15: Pulverdüsenhalterung mit Düse zum Anbau an die (schematisch dargestellte) Bearbeitungsoptik [188].

Schichtaufbau mit der Optik in der Höhe nachgeführt wird, bleibt die korrekte Arbeitsposition relativ zum Arbeitspunkt auf dem Werkstück stets erhalten. Die gewählten Parameter und Einstellungen zur Pulverzufuhr sind in Tabelle 3.1 auf Seite 48 wiedergegeben.

4.7 Prozesskontrolle und -regelung

Um das Lasergenerieren für unterschiedlichste Anwendungen einsetzen zu können, muss die Stabilität des Prozesses und die Reproduzierbarkeit des Bearbeitungsergebnisses gewährleistet sein. Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, wird die Ergebnisqualität jedoch auch von sich ändernden äußeren Faktoren wie zum Beispiel Bauteilgeometrie, -temperatur oder plötzlich auftretenden Störgrößen wie Schwankungen in der Förderkonstanz des Zusatzwerkstoffs beeinflusst. Zwei Ansätze, um die geforderte Prozessstabilität zu gewährleisten, sind entsprechend des Modulkonzepts in Verbindung mit der variablen Bearbeitungsoptik (Kapitel 4.5) umgesetzt worden. Dies ist zum einen eine **Regelung der Schmelzbadtemperatur**, mit der die Prozessführung auf sich ändernde geometrische und thermische Bauteilbedingungen angepasst werden kann und mit der sich die Bauteilqualität zum Beispiel durch verminderte Aufwürfe durch Wärmestaueffekte an Konturkanten verbessern lässt (vgl. Kapitel 3.3). Zum anderen wird eine On-line-Abstandsmessung zur **Kontrolle der erzeugten Spurhöhe** vorgestellt, bei der ein Sensor eingesetzt wird, der ursprünglich für das Laserabtragen entwickelt worden war.

In beiden Fällen erfolgt die Aufnahme der Messgrößen stets **koaxial zum Bearbeitungs-laserstrahl** durch die Bearbeitungsoptik hindurch: Gemessen wird das Signal, welches von der

Wechselwirkungszone auf der Werkstückoberfläche in die Optik einfällt und durch Schutzglas, Fokussierlinse und Umlenkspiegel hindurch von den entsprechenden auf der Optik montierten Sensoren detektiert werden kann (**Bild 4.16**). Diese koaxiale Prozessüberwachung hat gegenüber seitlich positionierten Detektoren den Vorteil, dass Signale aus der Wechselwirkungszone symmetrisch und unabhängig von Einflüssen der Vorschubrichtung gemessen werden können. Ausgeschlossen werden können sowohl Fehljustagen des Detektors, die bei seitlicher Anordnung leicht auftreten können, als auch unerwünschte Abschattungen, zum Beispiel durch Bauteilkanten oder durch die Pulverdüse. Die koaxiale Anordnung ist zudem unempfindlich gegenüber Höhenschwankungen der Wechselwirkungszone, was insbesondere bei der Abstandsmessung während des Lasergenerierens eine wichtige Rolle spielt.

4.7.1 Temperaturregelung

Die Messung der Schmelzbadtemperatur während des Generierens ist die Grundlage für eine stets optimale Anpassung der Laserleistung an sich ändernde Prozessbedingungen. Die Kenntnis der absoluten Temperatur ist dabei nicht notwendig; vielmehr kann auf eine bestimmte

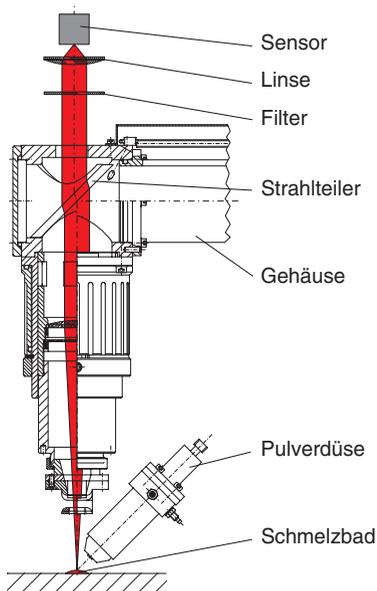


Bild 4.16: Detektion von Prozesssignalen aus der Wechselwirkungszone koaxial zum Bearbeitungslaserstrahl durch die Bearbeitungsoptik. Der Umlenkspiegel dient dabei als Strahlteiler.

Höhe des Temperatursignals geregelt werden, die dem **jeweils optimalen Prozesspunkt** einer definierten Spurbreite entspricht.

Zur Detektion der Schmelzbadtemperatur wurde eine **Silizium-Pin-Fotodiode** vom Typ *BPX 66* (*Siemens AG*) verwendet [189]. Dieser Typ wurde bereits zur Temperaturregelung beim Laserhärten und Laserbeschichten erfolgreich eingesetzt [190, 191]. Das vom Temperatursensor gelieferte Signal ist proportional zur Strahlungsleistung, die von der Fotodiode aufgenommen wird. Diese wiederum hängt ab vom detektierten Wellenlängenbereich, der Größe des erfassten Messfelds und dessen Temperaturverteilung.

4.7.1.1 Detektierter Wellenlängenbereich

Die prinzipielle Eignung von Fotodioden für die On-line-Temperaturmessung des Schmelzbads beim Laserbeschichten mit CO₂-Lasern wurde bereits 1990 nachgewiesen [192]. Beim Einsatz von Nd:YAG-Lasern muss jedoch beachtet werden, dass die Wellenlänge des BearbeitungsLasers im detektierten Spektrum der Fotodiode liegt: Ihre **spektrale Empfindlichkeit** reicht von 550 bis 1150 nm und ist über diesen Bereich nicht konstant. Der Verlauf der relativen spektralen Empfindlichkeit ist in **Bild 4.17** als dicke gestrichelte Linie dargestellt. Um eine Beeinflussung des Messsignals durch die im Bild gekennzeichnete Wellenlänge des Nd:YAG-BearbeitungsLasers oder durch störende Reflexionen im Bereich des sichtbaren Lichts von

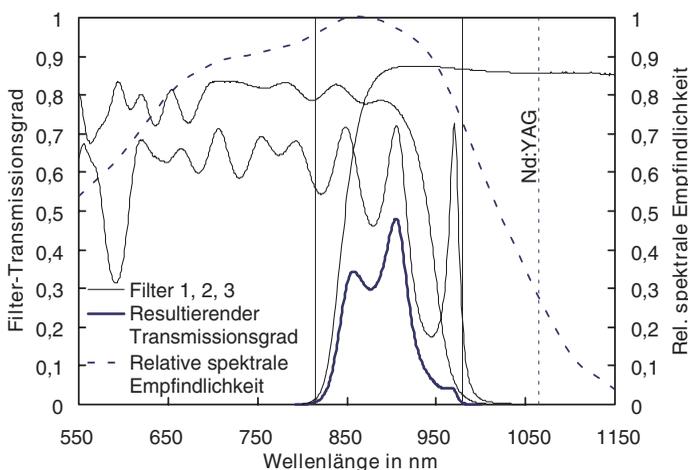


Bild 4.17: Transmissionsgrade $\vartheta(\lambda)$ des eingesetzten Filters (dicke durchgezogene Kurve). Das spektrale Fenster der von der Fotodiode detektierten Strahlung (senkrechte durchgezogene Linien) wird durch hintereinanderschalten dreier selektiver Filter erzielt (durchgezogene dünne Kurven). Die maximale spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode liegt in diesem Bereich (dick gestrichelte Kurve), die Bearbeitungswellenlänge des Nd:YAG-Lasers von 1064 nm wird wirksam abgeschirmt.

außen zu unterdrücken, wurden der Diode drei selektive Filter vorgeschaltet, deren Transmissionsgrad in Bild 4.17 als dünne Linien eingezeichnet sind. Der sich daraus ergebende Transmissionsbereich, dargestellt als dicke durchgezogene Linie, bildet das Wellenlängenfenster, durch das Strahlung aufgenommen wird; es liegt zwischen 815 und 980 nm im Bereich der maximalen relativen spektralen Empfindlichkeit der Fotodiode.

4.7.1.2 Messfeld

Zur Bestimmung der Größe des Messfelds auf der Werkstückoberfläche wurde der optische Weg der Messstrahlung in einer **Raytracing-Simulation** mit dem Software-Paket *OptiCAD* [193] in umgekehrter Richtung nachgebildet. **Bild 4.18** zeigt den Strahlengang durch die optischen Elemente und Aperturen und das daraus resultierende Messfeld mit einer Abmessung von ca. $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Die Form des Messfelds resultiert aus der quadratischen Empfängerfläche der Fotodiode.

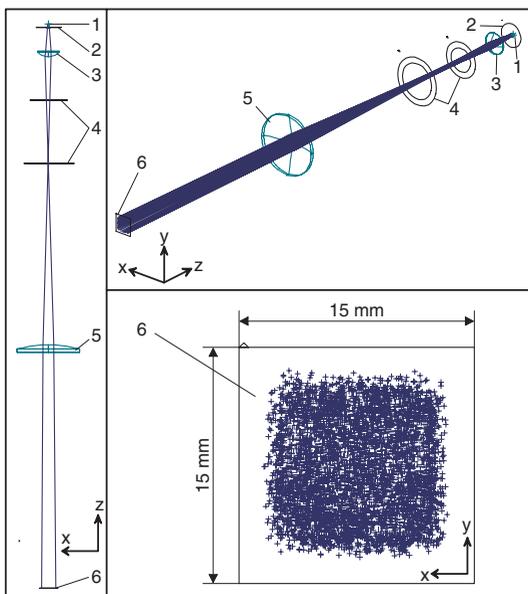


Bild 4.18: Raytracing-Simulation des Strahlengangs der von der Fotodiode detektierten Strahlung durch die variable Bearbeitungsoptik (ohne den durch den Strahlteiler verursachten seitlichen Versatz, vgl. Bild 4.16). 1: Diodenfläche, 2: Diodengehäuse, 3: Linse, 4: Gehäuseblenden, 5: Fokussierlinse, 6: Werkstückoberfläche. Es ergibt sich eine Messfeldgröße von ca. $10 \times 10 \text{ mm}^2$.

4.7.1.3 Temperaturverteilung

Die PLANCKSche Strahlungsformel beschreibt die spektrale Strahlungsleistung, die von einem schwarzen Strahler je Flächeneinheit in Abhängigkeit von seiner Temperatur T im Wellenlängenbereich $\lambda + d\lambda$ in den Halbraum $\Omega = 2\pi$ abgestrahlt wird mit

$$\frac{dP_\lambda}{F} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} d\lambda \quad (4.1)$$

Darin treten die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c_0 = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}, \quad (4.2)$$

die BOLTZMANN-Konstante

$$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad (4.3)$$

und die PLANCK-Konstante oder das PLANCKSche Wirkungsquantum

$$h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (4.4)$$

auf; F steht für die Fläche des Strahlers [194]. **Bild 4.19** zeigt die spektralen Strahlungsleistungen für verschiedene Temperaturen eines Strahlers der Größe $F = 1 \text{ mm}^2$ über einen breiten Wellenlängenbereich in den Halbraum. Der **tatsächlich von der Fotodiode detektierte Wellenlängenbereich** wird durch das Transmissionsfenster der Filter (siehe resultierende Transmissionsgradkurve $\vartheta(\lambda)$ aus Bild 4.17) begrenzt auf das durch die senkrechten strichpunktierten Linien abgegrenzten Intervall von $\lambda_1 = 815 \text{ nm}$ bis $\lambda_2 = 980 \text{ nm}$. Die Wellenlängenbereiche der Kurven-Maxima werden also nicht detektiert, weshalb das WIENSche

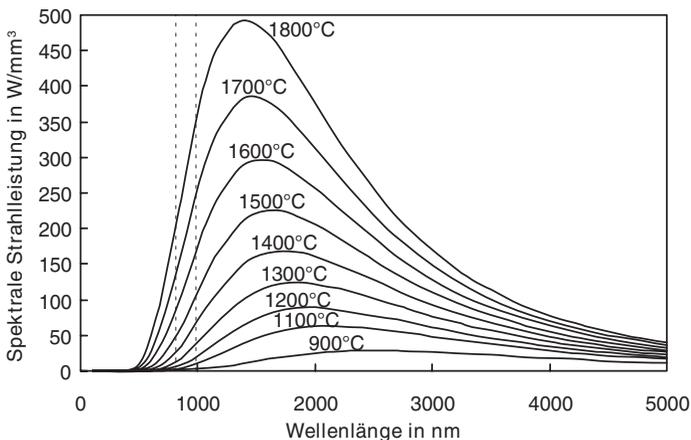


Bild 4.19: Spektrale Strahlungsleistung eines Strahlers der Fläche $F = 1 \text{ mm}^2$ in den Halbraum. Der mit senkrechten Linien gekennzeichnete Bereich kennzeichnet das detektierte Wellenlängenspektrum gemäß Bild 4.17.

Verschiebungsgesetz nicht anwendbar ist. Weiterhin wird der Verlauf der detektierten spektralen Strahlungsleistung durch die resultierende Transmissionsgradkurve $\vartheta(\lambda)$ der eingesetzten Filter wellenlängenspezifisch geprägt. Für diese Konfiguration zeigt **Bild 4.20** die spektrale Strahlungsleistung über der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen eines Strahlers der Fläche von 1 mm^2 .

Von der Strahlungsleistung, die vom Messfeld der Fotodiode auf der Werkstückoberfläche ausgeht, wird nur der Anteil auf die Sensorfläche abgebildet, der **parallel zur optischen Achse** auf die Fokussierlinse trifft (vgl. Bild 4.18). Die von einem Oberflächenpunkt detektierte Leistungsdichte im Wellenlängenbereich von λ_1 bis λ_2 ergibt sich also durch die Integration

$$I_{\vartheta}(T) = \frac{P}{F} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{h \cdot c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{\vartheta(\lambda)}{e^{\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} d\lambda \quad . \quad (4.5)$$

Diese Leistungsdichte der von einem Oberflächenpunkt detektierte Strahlung hängt damit nur von der Temperatur T dieses Oberflächenpunkts ab. Das Ergebnis der numerischen Integration über den betrachteten Wellenlängenbereich ist in **Bild 4.21** als Verlauf der Leistungsdichte über der Temperatur dargestellt. Es wird deutlich, dass Oberflächenpunkte mit einer Temperatur kleiner 800°C praktisch nichts, und solche mit einer Temperatur bis 1100°C nur sehr wenig zur gesamten vom Messfeld ausgehenden Strahlungsleistung beitragen.

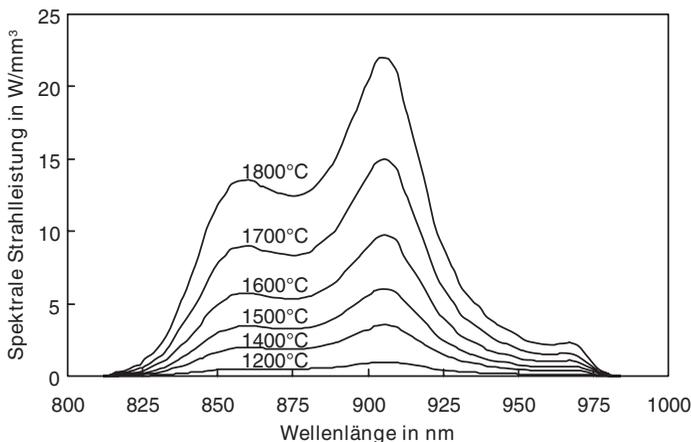


Bild 4.20: Spektrale Strahlungsleistung für unterschiedliche Oberflächentemperaturen eines Strahlers der Fläche $F = 1 \text{ mm}^2$ in den Halbraum, die durch die Filter des Temperatursensors treten kann.

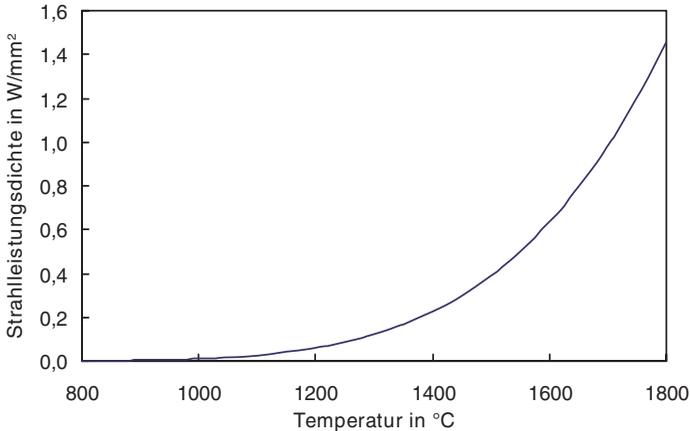


Bild 4.21: Von einem Oberflächenpunkt detektierte Strahlungsleistungsdichte nach Gl. (4.5) für den Wellenlängenbereich von 815 bis 980 nm und für eine Raumrichtung.

4.7.1.4 Modellierung des Messsignals

Da die eingesetzten Laserstrahldurchmesser und Spurbreiten mit 0,6 bis 2,4 mm wesentlich kleiner sind als die Dimensionen des Messfelds von 10 mm × 10 mm, muss überprüft werden, **in wie weit das Temperatursignal der Fotodiode von der Erwärmung peripherer Flächenteile des Werkstücks beeinflusst wird.** Um dies abzuschätzen, werden im Folgenden **zwei modellhafte Temperaturprofile** über dem Messfeld definiert und die detektierte Strahlungsleistung daraus abgeleitet.

Zunächst soll eine Temperaturverteilung betrachtet werden, bei der im gesamten Messfeld die Umgebungstemperatur von $T_0 = 20\text{ °C}$ herrscht mit Ausnahme eines Schmelzbads, dessen Größe durch den Laserstrahldurchmesser bestimmt ist und das eine konstante Temperatur aufweist. **Bild 4.22** zeigt die Schnitte durch dieses Temperaturprofil für zwei unterschiedliche Laserstrahldurchmesser und Schmelzbadtemperaturen. Dieses erste Temperaturmodell ist als – stark vereinfachter – Grenzfall für das Lasergenerieren auf einer bereits sehr **hoch aufgebauten Wand** denkbar, bei dem Wärmeleitung nur noch in bereits aufgebautes Materialvolumen, nicht aber in den (von oben sichtbaren) Grundkörper stattfindet. Die Vereinfachung betrifft dabei insbesondere die Annahme einer kreissymmetrischen Temperaturverteilung, welche die erhöhte Temperatur des aus dem Laserstrahl auslaufenden generierten Materials vernachlässigt.

In einem zweiten Temperaturmodell wird eine **gaußförmige Temperaturverteilung** abgebildet. Sie ist so angelegt, dass im Zentrum des Laserstrahls eine bestimmte maximale Schmelzbadtemperatur herrscht, welche zum Rand des Laserstrahls (und des Schmelzbads) auf eine Schmelztemperatur von $T_S = 1530\text{ °C}$ abfällt. Die Temperaturverteilung außerhalb des Laserstrahldurchmessers folgt der gaußschen Verteilung (**Bild 4.23**). Dieses Temperaturmodell

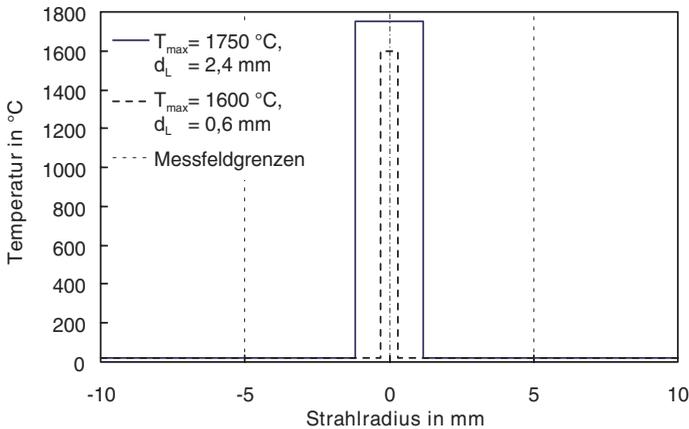


Bild 4.22: Temperaturmodell 1: Schnitt durch das Temperaturprofil des Messfelds bei sprungförmigem Temperaturverlauf, dargestellt für zwei verschiedene Strahldurchmesser und maximale Schmelzbadtemperaturen.

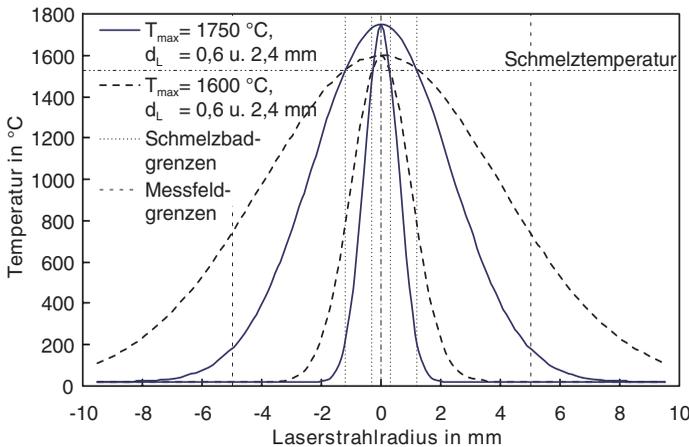


Bild 4.23: Temperaturmodell 2: Schnitt durch ein gaußförmiges Temperaturprofil des Messfelds, dargestellt für zwei verschiedene Strahldurchmesser und maximale Schmelzbadtemperaturen. Die Verteilungen sind so gewählt, dass in der Mitte jeweils die maximalen Schmelzbadtemperaturen und an den Schmelzbadrändern gerade die Schmelztemperatur herrschen.

entspricht dem Grenzfall des Lasergenerierens auf **ebenem Grundmaterial** mit sehr langer Prozesszeit, wo sich ein gaußförmiges Temperaturprofil ungehindert in alle Richtungen ausbilden kann. Auch in diesem Fall gilt wiederum die Vereinfachung der angenommenen Kreis-symmetrie.

Die Strahlungsleistungen, die aus einem Messfeld mit Temperaturprofilen nach Modell 1 oder 2 detektiert werden, lassen sich über die numerische Integration der temperaturabhängigen Strahlungsdichten aus Bild 4.21 über die einzelnen Flächenelemente des Messfelds berechnen. Als Ergebnis zeigt **Bild 4.24** die detektierten Strahlungsleistungen für verschiedene Maximaltemperaturen in beiden Modellen über dem die Schmelzbadgröße bestimmenden Laserstrahldurchmesser. Wie bereits festgestellt, tragen Oberflächenpunkte erst ab einer Temperatur von etwa 1100 °C maßgeblich zur detektierten Strahlungsleistung bei. Entsprechend weisen die Kurven für die Top-Hat-Temperaturverteilung in Modell 1 einen quadratischen Verlauf proportional zur Schmelzbadgröße auf und geben in ihren gleichmäßigen Abständen die Stufung des Parameters „Maximaltemperatur“ wieder (vgl. Bild 4.22). Die Kurven höherer Maximaltemperaturen liegen dabei erwartungsgemäß über denen niedrigerer Temperaturspitzen.

Die aus dem gaußförmigen Temperaturmodell 2 resultierenden Ergebniskurven zeigen durchweg kleinere Werte der detektierten Strahlungsleistung. Die Kurven niedrigerer Maximaltemperaturen liegen hier über denen höherer Spitzenwerte, da der Flächenanteil des Messfelds mit Temperaturen über 1100 °C größer wird, wenn der Temperaturspitzenwert sinkt. Dies liegt in den zunehmend flacher werdenden Temperaturprofilen durch die angenommenen Randbedingungen begründet, nach denen am Schmelzbadrand gerade noch Schmelztemperatur herrschen soll (vgl. Bild 4.23). In ihrem Verlauf über dem zunehmenden Strahldurchmesser liegen die Kurven zudem eng zusammen; die nur an einem Punkt auftretende Maximaltemperatur des Schmelzbadts ist in diesem Modell also von untergeordneter Bedeutung für das detektierte

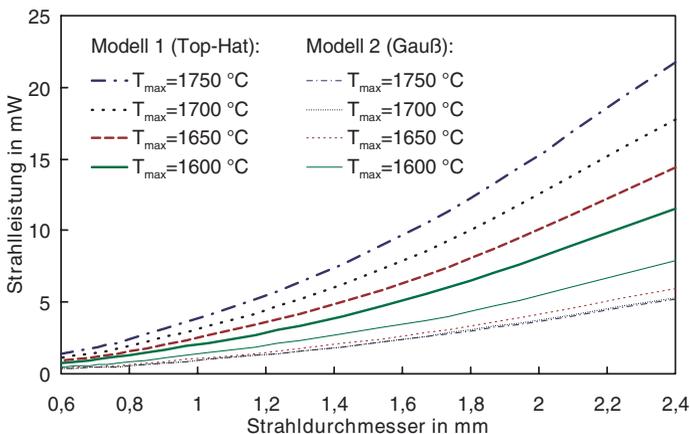


Bild 4.24: Berechnete detektierte Strahlungsleistung basierend auf den Temperaturmodellen aus den Bildern 4.22 und 4.23.

Signal.

Die tatsächliche Temperaturverteilung im Messfeld wird sich in der Praxis – beeinflusst von der Vorschubrichtung des Laserstrahls – unsymmetrisch ausbilden, wobei sich Verhältnisse vor, neben und hinter dem Schmelzbad einstellen, die stets zwischen den beiden in den Temperaturmodellen angenommenen Extremfällen liegen. Aus dieser Abschätzung lassen sich folgende **Grundsätze für die Temperaturdetektion** mit Fotodioden ableiten:

- Die detektierte Strahlungsleistung wird von der Erwärmung peripherer Flächenteile des Messfelds auf Temperaturen bis zu 1100 °C nur minimal erhöht. Der wesentliche Anteil resultiert aus den im Schmelzbad auftretenden Maximaltemperaturen.
- Mit zunehmendem Strahl- und damit Schmelzbad Durchmesser nimmt die detektierte Strahlungsleistung stetig zu. Die Verwendung des Signals als Eingangsgröße in einem Regelkreis ist dadurch möglich.

4.7.1.5 Messwerte

Die detektierte Strahlungsleistung wird durch die Fotodiode und die eingesetzte Elektronik zur Signalverstärkung in ein Messsignal umgesetzt. **Bild 4.25** zeigt die **typischen Signalverläufe** beim Lasergenerieren von einfachen Umfangsspuren mit unterschiedlichen Strahldurchmessern auf einem Drehteil: Nach der anfänglichen instationären Phase (vgl. Kapitel 3.3) erklimmt das Signal ein für den jeweiligen Strahldurchmesser typisches Niveau. Je größer der Strahldurchmesser, desto größer ist die Steigung der Signalverläufe durch die zunehmende

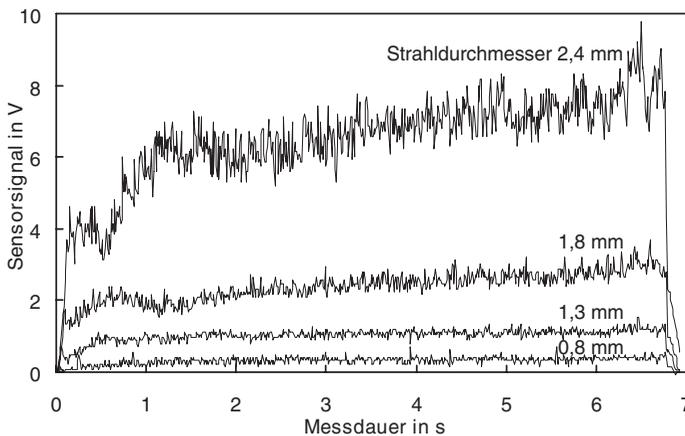


Bild 4.25: Signal der Fotodiode beim Lasergenerieren mit verschiedenen Strahldurchmessern und jeweils angepasster Laserleistung während einer Umdrehung auf einem Drehteil.

Bauteilerwärmung während der Prozesszeit. Die Mittelwerte der quasistationären Phase dieser typischen Messsignale sind in **Bild 4.26** über dem Strahldurchmesser aufgetragen.

Die direkte Gegenüberstellung dieser Messwerte mit den theoretischen Kurven der Strahlungsleistung aus den Temperaturmodellen in Bild 4.24 ist mangels der genauen Kenntnis der Kennlinie der elektrischen Verstärkung des Diodensignals nicht möglich. Es wird jedoch deutlich, dass bei der Regelung der Schmelzbadtemperatur bei variablen Spurbreiten **kein konstanter Sollwert** angenommen werden darf. Vielmehr muss ein Sollwert-Verlauf über dem einzustellenden Strahldurchmesser vorgegeben werden, der der Kurve in Bild 4.26 entspricht [195, 196].

4.7.1.6 Regelrechner

Bei der Regelung der Schmelzbadtemperatur geht das gemessene Diodensignal als Regelgröße und eine experimentell ermittelte Sollwertkurve ein, um die Laserleistung als Stellgröße anzupassen. Für einen PC mit analoger I/O-Karte wurde dazu ein Regelprogramm speziell für die Anwendung des Lasergenerierens in einem modularen Fertigungssystem entwickelt. Ausgehend von bekannten PID-Algorithmen, die bereits beim temperaturgeregelten Laserbeschichten und -härten zum Einsatz kamen [190, 191, 197], wurde dieses Regelrechner-Modul optimiert.

Basis einer On-line-Regelung ist eine auf die Frequenz des zu regelnden Prozesses abgestimmte Abtastfrequenz. Als Faustregel wird in der Regelungstechnik eine Abtastfrequenz angestrebt, die dem zehnfachen Wert der Frequenz der Störgröße entspricht [198]. Es erscheint

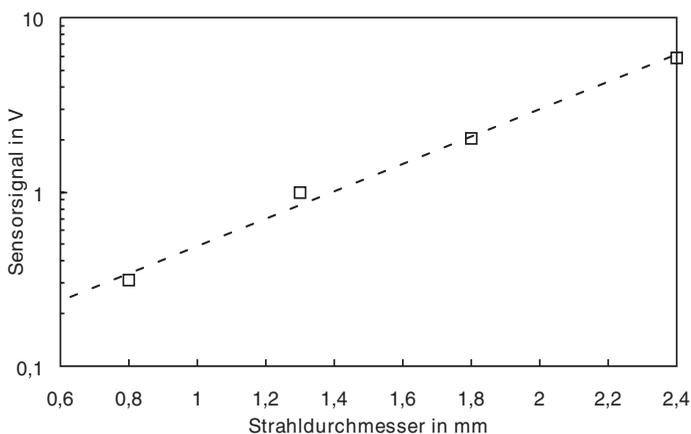


Bild 4.26: Zeitliche Mittelwerte von Diodensignalen zweier Messreihen, in denen diskrete Laserstrahldurchmesser eingestellt wurden, sowie die Interpolation (gestrichelt).

jedoch wenig sinnvoll, die bei der Lasermaterialbearbeitung auftretenden Schmelzbadfluktuationen, deren typische Frequenzen im Bereich mehrerer kHz liegen können, auszuregeln. Der Bereich der **praktikablen Abtastfrequenzen** lässt sich nach unten durch die Wechselwirkungszeiten abgrenzen. Geht man davon aus, dass während einer Bearbeitungslänge, die dem Laserstrahldurchmesser entspricht, zehn Regelzyklen notwendig sind, so ergibt sich beim verwendeten minimalen Strahldurchmesser von ca. 0,6 mm und der typischen Vorschubgeschwindigkeit von 600 mm/min eine minimale Abtastfrequenz von 166 Hz. Nach oben ist die Abtastfrequenz durch die Reaktionszeit der Regelgröße Laserleistung begrenzt, die heute üblichen Nd:YAG-Laser auf Änderungen des Leistungssignals liegen deutlich unter 5 ms. Der Bereich sinnvoller Abtastfrequenzen lässt sich also unter Berücksichtigung ausreichender Reserven mit 1 kHz nach oben abgrenzen.

Die einstellbare Abtastfrequenz erreicht auf einem 80486-PC mit 66 MHz Taktfrequenz Werte bis zu 1 kHz. Das Eingangssignal kann dabei einer gleitenden Mittelwertbildung unterworfen werden, die als **Tiefpassfilter** wirkt. Der Sollwert kann sowohl konstant eingestellt, als auch durch ein externes Analogsignal vorgegeben werden. Beim Lasergenerieren mit variablen Strahldurchmessern stammt der auf den momentan eingestellten Strahldurchmesser abgestimmte Sollwert vom Leitreechner des Systems. Wie in Bild 4.1 auf Seite 68 skizziert, ist der Regelreechner steuerungstechnisch zwischen dem Leitreechner des modularen Fertigungssystems und der Laserstrahlquelle geschaltet. Im Betriebsmodus „Automatik“ sind für diese Systemkomponente keinerlei Bedieneingaben notwendig.

Bedingt durch die unterschiedlichen Wechselwirkungszeiten für verschiedene Strahldurchmesser bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit sind **unterschiedliche Schmelzbadcharakteristika** zu beobachten: Das Schmelzbad eines großen Strahldurchmessers unterliegt langen Wechselwirkungszeiten und zeigt sich eher „träge“; im Regelkreis benötigt es damit eine kleinere Dämpfung als das eher „unruhige“ Schmelzbad bei kleinen Strahldurchmessern und kurzen Wechselwirkungszeiten (vgl. auch Kapitel 3.3). Um dieses unterschiedliche Verhalten des Prozesses bei der Strahldurchmesservariation optimal zu regeln, wurde die Möglichkeit implementiert, verschiedene Regelparametersätze abzulegen, die je nach Größe des externen Sollwert-Signals für die Regelung verwendet werden [179].

4.7.2 Schichtdickenkontrolle

4.7.2.1 Anforderungen

Zur Messung der Schichtdicke direkt in der Wechselwirkungszone werden an ein Messsystem hohe Anforderungen gestellt, denn das durch den Laserstrahl erzeugte Schmelzbad ist unterschiedlichen physikalischen Mechanismen unterworfen, die die Messqualität beeinflussen: Durch Temperatur- und damit Oberflächenspannungsgradienten wird eine Konvektion des Schmelzbads zu Marangoni-Strömungen angetrieben [199, 200]. Die Ausbildung einer Marangoni-Strömung kann jedoch von hochschmelzenden Deckschichten (Oxiden, Nitriden, Pulverpartikeln) an der Oberfläche eingeschränkt oder verhindert werden [177]. Durch die entstehende Schicht liegt im stationären Zustand des Lasergenerierungsprozesses **kein ebenes**

Schmelzbad vor. Vielmehr bildet sich ein der Spurbreite und -höhe entsprechendes sphärisches Schmelzvolumen aus, das aufgrund von Schwankungen der Laserleistung, der Werkstoffhomogenität und durch die o. g. Strömungs- und Oberflächenphänomene eine mehr oder weniger **ausgeprägte Dynamik** aufweist.

Bei der Auswahl eines geeigneten Messverfahrens und -systems für On-line-Messungen der generierten Spurhöhe, in der die Detektion des Messsignals direkt in der Wechselwirkungszone von Material und Laserstrahl erfolgt, müssen folgende Aspekte besonders beachtet werden [201]:

- Die bereits erwähnten hochdynamischen Vorgänge in der Schmelzbadoberfläche führt bei Abstandsmessungen zu einem **unvermeidbaren Rauschen** im Signalverlauf.
- Die bei der Lasermaterialbearbeitung eingesetzten hohen Intensitäten bergen die Gefahr der Überstrahlung optischer Messsysteme durch reflektierte und gestreute Strahlung. Messverfahren, die empfindlich auf Fremdlichteinfluss reagieren, müssen durch eine **genau abgestimmte Filterung** von der Wellenlänge des Bearbeitungslasers abgeschirmt werden. Oftmals ist auch die vom Schmelzbad emittierte starke Strahlung im sichtbaren und infraroten Spektrum störend. Die Messwellenlängen vieler aktiver optischer Systeme liegen innerhalb des sehr breiten emittierten Spektrums, so dass es zu störenden Überlagerungen kommt, die durch Filtern nicht beseitigt werden können.
- Der Zusatzwerkstoff wird von oben dem Schmelzbad zugeführt. Je nach dem, aus welcher Beobachtungsrichtung gemessen wird, kann durch das Pulver **Abschattung oder Streuung** verursacht werden.
- Die kleinen Schmelzbadabmessungen und die Notwendigkeit einer genauen Lokalisierung des Messpunkts erfordern eine **angepasste Messfleckgröße**. Sie sollte eine Größenordnung kleiner als der Laserstrahldurchmesser sein, also im Bereich von 0,1 mm liegen.

Gemäß dem Konzept des modularen Fertigungssystems, in dem auf Werkzeugmaschinen als Handhabungssysteme zurückgegriffen wird, müssen zudem alle zur Messung notwendigen Komponenten im jeweiligen Arbeitsraum der Maschine untergebracht werden können. Weitere Anforderungen an in Frage kommende Geräte sind:

- Hinsichtlich der vorgesehenen zu generierenden Strukturen und Geometrien ist ein **Messbereich** von ca. 10 mm und eine **Auflösung** von ca. 50 μm erforderlich.
- Der **Arbeitsabstand** zur Wechselwirkungszone muss so groß sein, dass das Messsystem nicht durch Pulverpartikel, Schmelzspritzer oder Temperatureinwirkung beeinflusst wird. Ein Richtwert für den minimalen Arbeitsabstand sind ca. 50 mm.

Eine On-line-Schichtdickenregelung auf Grund des Messsignals aus der Wechselwirkungszone ist durch das Prinzip des Lasergenerierungsprozesses erschwert: Durch die sphärische Form des Schmelzvolumens am Kopf der entstehenden Beschichtungsspur ist die genaue Kenntnis des Messorts und eine sehr genaue Justage des Messpunkts notwendig. Wird der Messpunkt im Zentrum des Schmelzbads platziert, muss mit dem erwähnten gewissen Signalrauschen gerechnet werden, welches im schlechtesten Fall die Größe der Schichtdicke erreichen kann. Aus diesen Gründen wäre es vorteilhaft, den Messpunkt an der Schmelzbadfront oder im

Bereich der erstarrenden Schmelze zu positionieren. Bei beiden Varianten sind die Möglichkeiten der Prozess- und Ergebnisbeeinflussung im Sinne einer On-line-Regelung sehr stark eingeschränkt. Dieser Aspekt ist ein prinzipielles Problem bei der in-situ Prozesskontrolle des Laserbeschichtens, er ist unabhängig von spezifischen Messprinzipien.

4.7.2.2 Sensor

In den Versuchen zu dieser Arbeit kam ein berührungsloses Messsystem der Firma *Laser-Tec* (früher *LCTec Laser- und Computertechnik GmbH*), Kempten, zum Einsatz. Das mit dem Lehrstuhl für Optik der Universität Erlangen entwickelte System war eine Kernkomponente der *LaserCav*-Maschinen der Firma *Maho AG* als erste Serienmaschinen zum dreidimensionalen Laserabtragen [151, 152, 202, 203, 204]. Montiert auf der variable Bearbeitungsoptik ist der Sensorkopf in Bild 4.7 auf Seite 75 erkennbar.

Das Funktionsprinzip des Sensors beruht auf einer speziellen Art der **Triangulation**. Als besonderes Kennzeichen verfügt er nicht über eine eigene Lichtquelle, sondern er wertet die von einem Schmelzbad ausgehende Emission in einem für CCD-Kameras typischen Wellenlängenbereich aus (**passiver Sensor**). Den Aufbau des optischen Teils zeigt **Bild 4.27**: Aus der von der Fokussierlinse kollimierten und durch den Umlenkspiegel der Bearbeitungsoptik transmittierten Strahlung wird zunächst die Wellenlänge des Nd:YAG-Bearbeitungslasers durch zwei entsprechende Filtergläser (1) herausgefiltert, um Überstrahlung der CCD-Zeilenkamera zu vermeiden. Die Strahlung wird dann im Sensorgehäuse mittels Umlenkspiegel (2) um 90° auf eine Doppelspaltblende (3) gelenkt. Die beiden durch diesen Doppelspalt fallenden Strahlenbündel werden zunächst durch eine plankonvexe symmetrische Linse (4) und

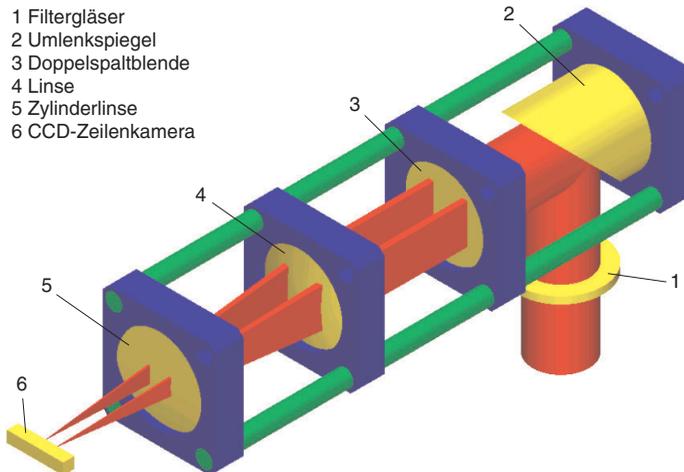


Bild 4.27: Schema des optischen Teils des Sensors [205].

schließlich eine zylindrische Linse (5) auf eine waagrecht angeordnete CCD-Zeilenkamera (6) abgebildet [205].

Im Bild der CCD-Zeilenkamera erscheinen die beiden Strahlenbündel als zwei Helligkeitsmaxima (Peaks), wie sie in **Bild 4.28** skizziert sind. Der Abstand der beiden Peaks (3) enthält die Tiefeninformation:

- Entfernt sich das Schmelzbad als Lichtquelle von der Fokussierlinse (der Messort ist „tiefer“), dann verringert sich der Öffnungswinkel des Strahlkegels nach der Fokussierlinse, und die beiden Helligkeitsmaxima auf der Zeilenkamera rücken näher zusammen.
- Bewegt sich das Schmelzbad dagegen in die Richtung der Fokussierlinse (der Messort ist „höher“), vergrößert sich der Öffnungswinkel des Strahlkegels, und der Abstand der beiden Peaks nimmt zu.

An einzelnen der in Bild 4.28 skizzierten Größen lässt sich die Qualität einer Messreihe und die des zugrundeliegenden Prozesses beurteilen:

- Der eigentliche **Tiefenmesswert** ist der Abstand der beiden Peaks. Unterliegt dieser Wert starken Schwankungen, muss von einem verrauschten Messsignal aufgrund eines unruhigen Laserprozesses ausgegangen werden.
- Ein gleichbleibender Wert des Mittelpixels ist ein Zeichen für eine konstante Position der Strahlungsquelle (Schmelzbad) auf dem Werkstück und einen quasistationären Prozesszustand.

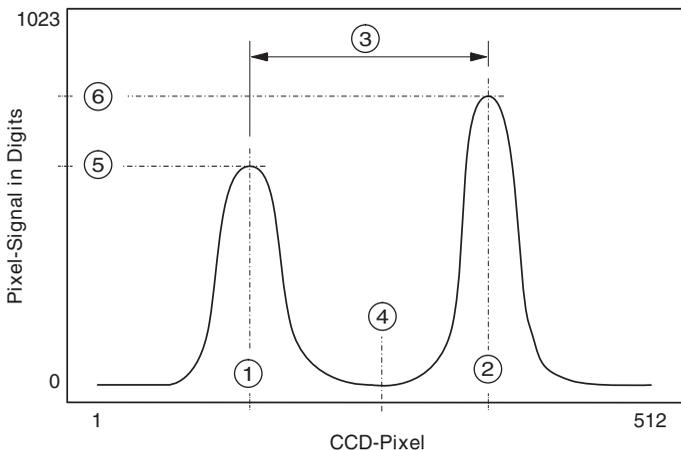


Bild 4.28: Skizze des von der CCD-Zeilenkamera empfangenen Signals. Die charakteristischen Größen sind: Positionen des ersten (1) und zweiten Peaks (2); Abstand der beiden Peaks (3), Position des (berechneten) Mittelpixels zwischen den Peaks (4); Amplituden des ersten (5) und zweiten Peaks (6) [205].

- Die Energiedichte der von der CCD-Zeilenkamera detektierten Strahlung bestimmt die Amplitude der einzelnen Peaks. Starke Schwankungen dieser Werte weisen auf einen sehr unruhigen Laserprozess mit starker Fluktuation der Helligkeit hin; eine Überhöhung eines Peaks gegenüber dem anderen auf eine Dejustage des Sensors.

Die technischen Eckwerte des Messsystems enthält **Tabelle 4.2**. Weitere Details zum Prinzip des Doppelspaltsensors und zur Signalauswertung finden sich in [205, 206].

4.7.2.3 Kalibrierung

Ein wesentlicher Schritt zur Kalibrierung des Sensors ist die Bestimmung der Faktoren zur Umrechnung des Peak-Abstands in der Einheit Pixel in Höhenwerte der Einheit μm . Es hat sich gezeigt, dass diese Faktoren genau **auf den jeweiligen Prozess abgestimmt** werden müssen. Dies umfasst die Abstimmung auf jede Änderung der einzelnen Prozessparameter und jede der typischen Spurcharakteristika (Grund- oder Folgespur). Die Ursache dafür ist in **Bild 4.29** skizziert: Der Messwert wird nicht auf der erstarrten Spur, sondern auf dem **flüssigen Schmelzbad** aufgenommen. Die Schmelzbadgeometrie, also Radius, Neigung und Länge, hängt allerdings sehr stark von den Prozessparametern wie Vorschubgeschwindigkeit, Pulvermassenstrom etc. ab. Für eine exakte Messung – oder genauer: eine exakte „Voraussage“ der erstarrten Spurhöhe hinter dem Messpunkt – müssen die Faktoren also auf die entsprechende Schmelzbadgeometrie abgestimmt sein und den spezifischen Höhenversatz berücksichtigen, der von den eingestellten Prozessparametern abhängt.

Aufgrund der erheblichen Steigung der Schmelzbadfront unter dem Laserstrahl ergibt sich z.T. ein beträchtliches Signalrauschen in den Messwerten, so dass eine Glättung der Kurven durch gleitende Mittelwertbildung von sechs bis zehn Werten notwendig ist.

Da sich das passive Messsystem der Strahlung aus dem prozess bedient, die von der CCD-Zeilenkamera detektiert werden kann, muss auch deren Belichtungszeit für eine Kalibrierung der Peak-Höhe auf jeden Parametersatz des Prozesses abgestimmt werden. Dieser relativ aufwändige Kalibrierungsschritt birgt jedoch – je nach spektraler Empfindlichkeit der Kamera – das Potenzial, die detektierte Strahlungsleistung, die sich in der Peak-Höhe niederschlägt, **simultan als Temperatursignal** auszuwerten (vgl. Kapitel 4.7.1).

Messbereich:	10 mm
Auflösung:	10 μm
Arbeitsabstand:	Brennweite der Fokussierlinse
Messpunktgröße:	entspricht Bearbeitungslaserfokus
Abtastfrequenz:	bis 1 kHz
Baugröße:	ca. 80 mm \times 100 mm \times 160 mm
Gewicht:	ca. 4 kg

Tabelle 4.2: Technische Daten des Abstandmesssystems [207].

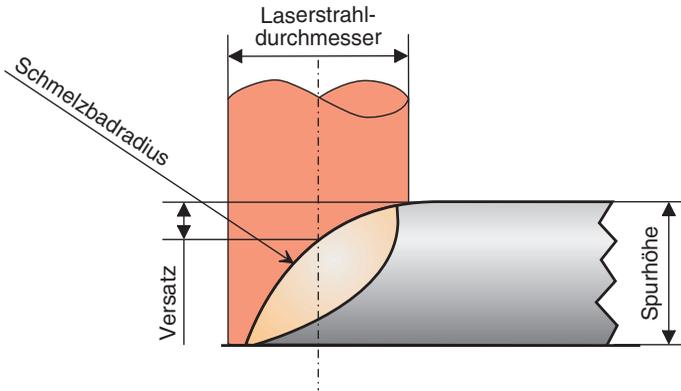


Bild 4.29: Zwischen der Höhe des Messorts auf der Laserstrahlachse und der tatsächlichen Spurhöhe besteht ein geometrie- und damit parameterabhängiger Versatz.

4.7.2.4 Messwerte

Eine beispielhafte Profilmessung während des Generierens einer Einzelspur beim Strahldurchmesser von 0,7 mm zeigt **Bild 4.30**. Die dünne Linie gibt das ungefilterte Sensorsignal mit dem typischen Rauschteil aus dem Laserprozess wieder. Erst der durch gleitende Mittelwertbildung errechnete Signalverlauf zeigt ein Oberflächenprofil, welches mit dem durch eine nachträgliche Tastschnittmessung festgestellten (dicke Linie) vergleichbar ist [205].

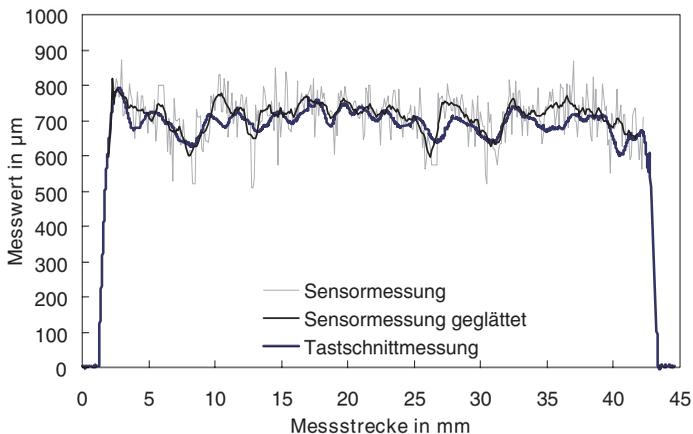


Bild 4.30: Vergleich einer Sensor- und einer nachträglichen Tastschnittmessung einer Einzelspur bei 0,7 mm Strahldurchmesser.

4.7.2.5 Bewertung des Messsystems

Es zeigt sich, dass sich das Messsystem aufgrund seiner Komplexität und der zahlreichen Einflüsse der unterschiedlichen Prozess- und Anlagenparameter nicht als „plug-and-play“-Lösung für die Abstandsmessung bei unterschiedlichen Strahldurchmessern eignet. Vor allem die Ermittlung der korrekten Kalibrierungsparameter erfordert ein nicht unwesentliches Maß an Verständnis über Funktionsweise und Messprinzip dieses Sensors. Dafür verspricht das Gerät – nach entsprechender Kalibrierung – eine **sehr gute Messgenauigkeit** beim Lasergenerieren. So konnten mit der in dieser Arbeit beschriebenen Anlage und einem Laserstrahldurchmesser von 0,7 mm generierte Spuren on-line vermessen werden, bei denen die Messergebnisse um maximal $\pm 50 \mu\text{m}$ von der mit dem Tastschnittverfahren ermittelten Endkontur abweichen. Der erforderliche Verständnis-, Justage- und Kalibrieraufwand darf auch nicht darüber hinwegtäuschen, dass *jeder* Sensor – egal welchen Messprinzips – einer entsprechenden Prozedur zur Vorbereitung präziser Messungen bedarf.

5 Ergebnisse aus den Laboranlagen

In diesem Kapitel werden einige beispielhafte Ergebnisse vorgestellt, die auf modularen Fertigungssystemen im Labormaßstab unter Einsatz der in Kapitel 4 vorgestellten Module erzielt worden sind.

5.1 Drehzentrum

Zur Demonstration der Möglichkeiten, praktisch beliebig hohe Spurstapel in guter Qualität und mit senkrechter Kantengeometrie am Laserein- und -ausschaltpunkt aufzubauen, zeigt **Bild 5.1** in einem Drehzentrum über den Drehwinkel von 300° generierte Stapel aus einer, zehn, 20 und 30 Spuren mit einer Breite von 1 mm. Nach jeder generierten Lage (Spurhöhe 0,5 mm) wurden die Spurruppen auf einen verbleibenden Schichtzuwachs von 0,3 mm abgedreht, um plane Flächen für das Aufbringen der Spuren der nächsten Lage zu schaffen.



Bild 5.1: Demonstrationsteil für den Aufbau von Spurstapeln: Auf Rohrmaterial (Durchmesser 14 mm) im Abstand von 2,5 mm aufgebaute Spurstapel aus 1, 10, 20 und 30 Spuren mit jeweils 0,3 mm Höhe und 1 mm Breite.

In **Bild 5.2** ist eine Fertigungsfolge aus spanenden und lasergestützten Bearbeitungsschritten zur Herstellung eines Bolzens in einer Aufsicht skizziert. Das laserintegrierte modulare Fertigungssystem erlaubt die in diesem Beispiel die komplette Fertigung des Bauteils inklusive gehärteter Funktionsflächen. **Bild 5.3** zeigt davon drei Bearbeitungsstadien: Halbzeug, generierter und an den Planflächen noch unbearbeiteter Bund und Fertigteil.

Ebenfalls ein Beispiel für den alternierenden Einsatz spanender und generierender Arbeitsschritte in einem laserintegrierten Drehzentrum zeigt **Bild 5.4**: Auf Rundmaterial werden nach einer vorbereitenden Drehbearbeitung fünf Lagen aus je zwei 2 mm breiten und 0,8 mm ho-

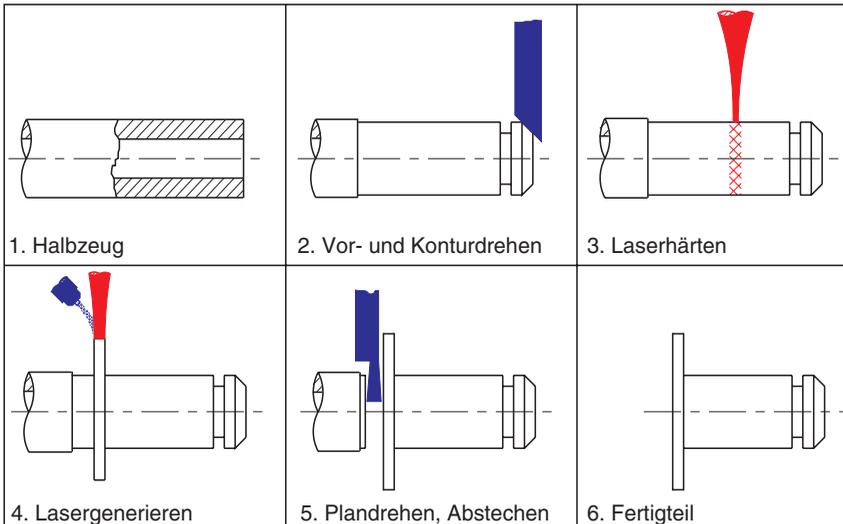


Bild 5.2: Beispiel für eine Fertigungsfolge aus spanenden und lasergestützten Bearbeitungsschritten zur Herstellung eines Bolzens in einer Aufsicht.



Bild 5.3: Bearbeitungsstadien einer Fertigungsfolge gemäß Bild 5.2: Ausgangsmaterial (links), lasergenerierter unbearbeiteter Bund (Mitte) und Fertigteil (rechts).

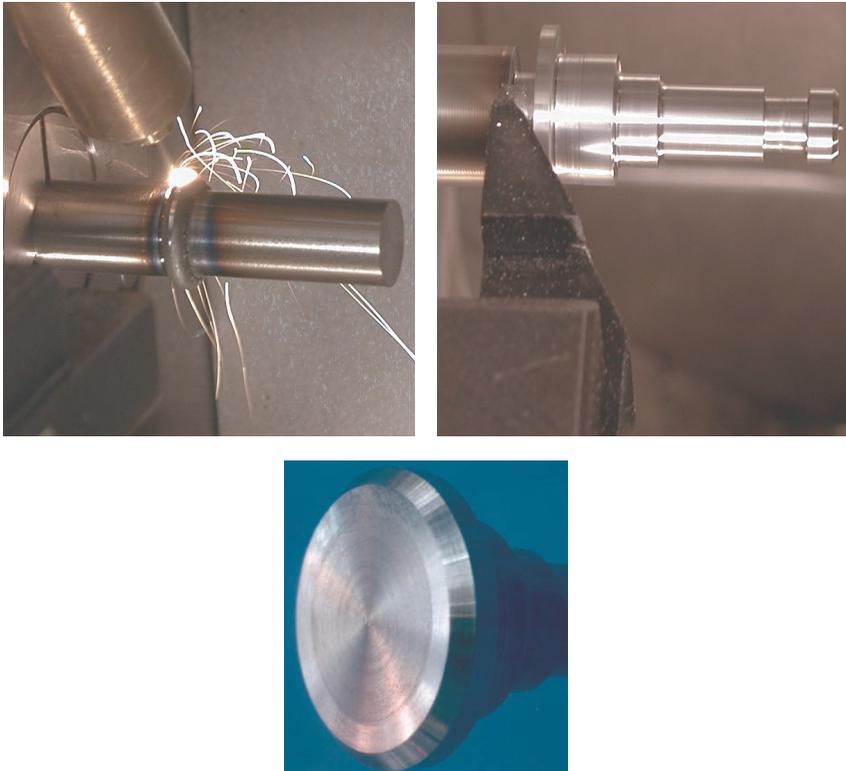


Bild 5.4: Herstellung eines Bolzens mit generiertem Bund (Durchmesser 20 mm) aus fünf Lagen mit je 0,5 mm Höhe und alternierender spanender Bearbeitung.

hen Umfangs-Spuren aufgebracht. Nach jeder vervollständigten Lage werden die Spurrücken auf einen verbleibenden Schichtzuwachs von 0,5 mm abgedreht, so dass plane Flächen für die Spuren der nächsten Lage erzeugt werden. Abschließend wird die Geometrie des Bundes und des Schafts gedreht und das fertige Bauteil abgestochen. Das generierte Materialvolumen ist rechts in Bild 5.4 sehr gut zu erkennen. Weitere Bearbeitungsschritte in dieser Aufspannung wären möglich.

Ein Beispiel für eine Geometrie mit feinen unterbrochenen Konturen, die nicht ohne weiteres rein spanend hergestellt werden kann, ist das in **Bild 5.5** gezeigte Rad mit sechs überlappenden Flügeln: Auf rundes Ausgangsmaterial werden nach der vorbereitenden Drehbearbeitung 30 Lagen von Spuren mit einer Breite von 0,8 mm und einer Höhe von 0,5 mm generiert; die einzelnen Flügel wachsen also simultan in die Höhe. Nach jeder generierten Lage werden die Spurrücken auf einen verbleibenden Schichtzuwachs von 0,3 mm abgedreht. Um die Gratbildung beim Abdrehvorgang zu minimieren und keine Seitenkräfte aufzubringen, die die filigranen Strukturen verbiegen könnten, wird ein Drehmeißel mit einer Breite von 10 mm für

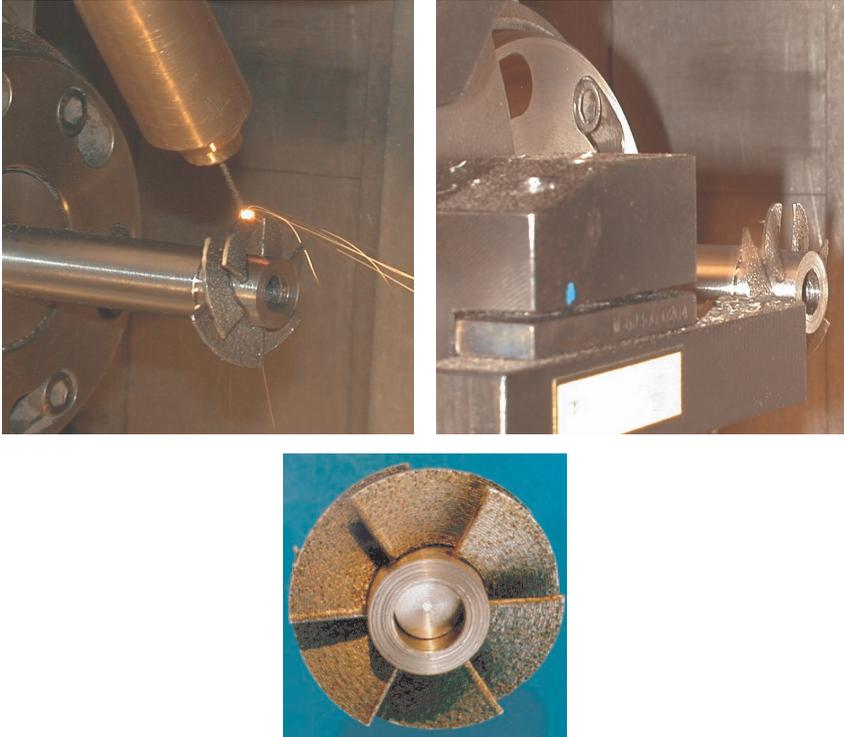


Bild 5.5: Herstellung eines Flügelrades (Durchmesser 32 mm) aus 30 generierten Lagen mit je 0,3 mm Höhe und 0,8 mm Breite und alternierender spanender Bearbeitung.

die radial stechende spanende Zwischenbearbeitung verwendet.

Da dieses Drehteil ein relativ geringes Bauteilvolumen aufweist und eine Wärmeableitung aus dem Bauteil durch das Spannfutter behindert wird, besteht die Gefahr der Überhitzung des Bauteils. Insbesondere während des länger andauernden Aufbauprozesses kann die Bauteilqualität durch hohe Temperaturen, starke Eigenspannungen oder gar Maßabweichungen durch Wärmestau an den Konturkanten herabgesetzt werden. Eine Regelung der Schmelzbadtemperatur mit entsprechender Anpassung der Laserleistung ist deshalb unabdingbar. **Bild 5.6** zeigt die Verläufe von Ist- und Stellwert der Temperaturregelung während des Materialaufbaus: Aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte des Diodensignals sowie die Mittelwerte der angeforderten Laserleistung beim Generieren der einzelnen Lagen des sechsten Flügels des Bauteils. Es zeigt sich ein abfallend konvergierender Verlauf der notwendigen Laserleistung: Durch die Bauteilerwärmung und die zunehmende Behinderung der Wärmeableitung mit wachsender Lagenzahl ist immer weniger Leistung für das Generieren einer Lage notwendig. Ab der zehnten Lage pendelt sich der Leistungsbedarf auf einen relativ gleichbleibenden Wert ein, der bei ca. 60 % der Leistung der ersten Spur liegt. Die ebenfalls aufgetragenen

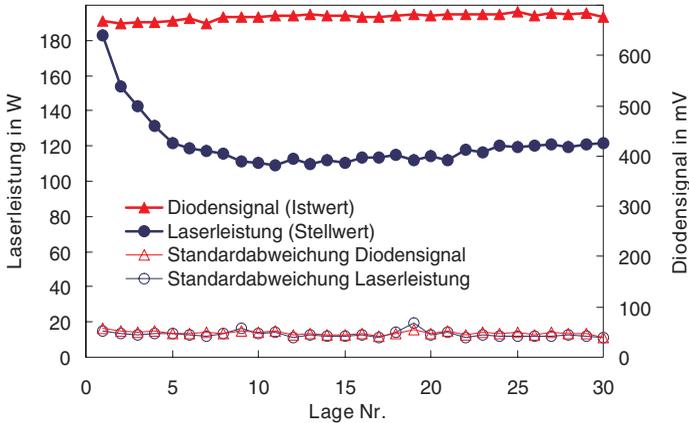


Bild 5.6: Abnahme der mittleren Laserleistung durch Temperaturregelung auf ein konstantes Diodensignal beim Generieren des sechsten Flügels eines Flügelrades. Jeder Punkt ist der Mittelwert der aufgezeichneten Verläufe von Ist- und Stellwert beim Generieren einer einzelnen Spur. An den gleichbleibend niedrigen Standardabweichungen von Ist- und Stellwert zeigt sich die Stabilität des Prozesses.

Standardabweichungen der Signalverläufe von Ist- und Stellwert jeder Lage zeigen, dass die Signalverläufe, die hier durch Mittelung in jeweils einen einzelnen Punkte zusammengefasst sind, dank eines stabilen Prozesses relativ gleichmäßige Amplituden aufweisen.

Die Herstellung der in Bild 5.4 und Bild 5.5 dargestellten Musterteile im modularen Fertigungssystem auf der Basis des Drehzentrums wird ausführlich in einem Lehrfilm [208] gezeigt.

5.2 Fräszentrum

Auf dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Fräszentrum als Handhabungssystem wurde das in Kapitel 4.7.2 vorgestellte Sensorsystem zur Schichtdickenkontrolle eingesetzt. **Bild 5.7** zeigt die Sensorsignale beim Generieren eines Spurstapels aus sechs Spuren bei einem Laserstrahldurchmesser von 0,6 mm und ohne alternierende spanende Bearbeitung. Da Optik und Sensor nach jeder Lage in der Höhe zugestellt werden, liegen die Messwerte der einzelnen Kurven übereinander und wurden zur besseren Verständlichkeit um das Zustellungsmaß angehoben. Deutlich zeigt sich die Fortpflanzung von Unebenheiten von Lage zu Lage, woraus – insbesondere im Vergleich zum Werkstück in Bild 5.5 – der hohe Nutzen einer alternierenden spanenden Bearbeitung ersichtlich wird.

Ein beispielhaftes realitätsnahes Werkstück, bei dessen Herstellung der Strahldurchmesser während der Laserbearbeitung verändert wurde, zeigt **Bild 5.8**. Es handelt sich um einen Spur-

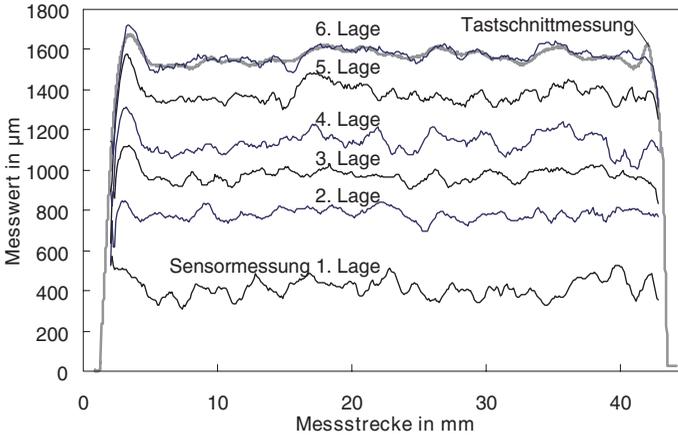


Bild 5.7: Höhenmesswerte beim Generieren eines Stapels aus sechs Spuren (Strahldurchmesser 0,6 mm) ohne spanende Bearbeitung. Zusätzlich eingetragen ist das Ergebnis der Tastschnittmessung der fertigen Kontur.

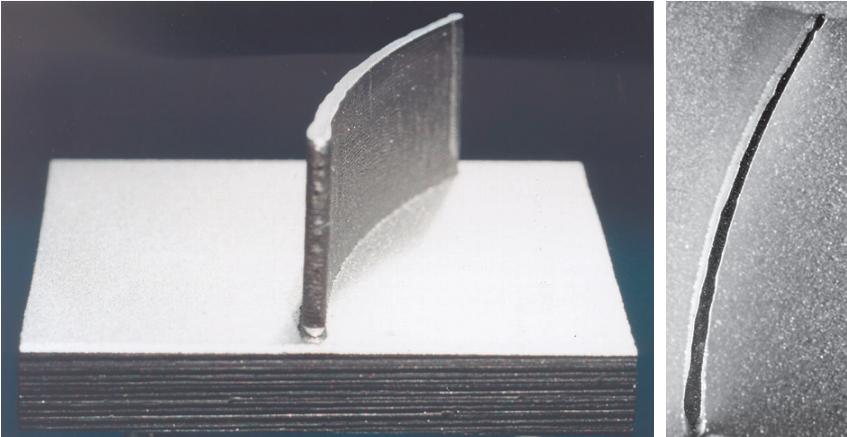


Bild 5.8: Geometrie ähnlich einer Turbinenschaufel, generiert als Spurstapel aus 32 Lagen mit veränderlicher Spurbreite von 2,4 auf 0,8 mm. Die Spurbhöhe beträgt 0,5 mm und wird durch alternierendes Planfräsen auf 0,3 mm reduziert.

stapel auf ebenes Grundmaterial, der – ähnlich einer Turbinenschaufel – in gebogener Form einen schlank zulaufenden Querschnitt aufweist. Der Strahldurchmesser wurde von 2,4 auf 0,8 mm linear verringert; die generierte Spurbhöhe von 0,5 mm jeder Lage auf 0,3 mm durch Planfräsen vermindert.

6 Zusammenfassung

In breiten Anwendungsfeldern im Automobil- und Maschinenbau gibt es einen bislang weitgehend ungedeckten Bedarf an automatisiert hergestellten Muster- oder Einzelteilen sowie Kleinserien aus Metall. Ein modulares Fertigungssystem aus einer teilespezifischen Werkzeugmaschine (zum Beispiel einem Drehzentrum) mit integrierter Ausrüstung zum Lasergenerieren bietet einen flexiblen Ansatz, diesen Bedarf zu bedienen. Das Lasergenerieren eröffnet dabei neue Möglichkeiten bei der Auswahl der Halbzeuge und bei Verfahrensfolgen aus additiven und subtraktiven Bearbeitungsschritten.

Das **Lasergenerieren** zielt im Wesentlichen darauf ab,

- dreidimensionale, oft schmale und unterbrochene Volumenstrukturen mit
- homogenen Materialeigenschaften und
- möglichst geringen Formabweichungen gegenüber der Sollkontur
- bei minimaler Einschmelztiefe in
- Prozesszeiten bis zu mehreren Stunden zu erzeugen, so dass ein hoher Automatisierungsgrad unabdingbar ist.

Um die geometrischen Freiheitsgrade des Lasergenerierens zu erweitern, wurde in dieser Arbeit eine Möglichkeit vorgestellt, den Laserstrahldurchmesser und damit **die Breite der generierten Materialsuren während des Prozesses zu verändern**. Der notwendige Aufwand für eine Strahldurchmesservariation ist jedoch eng verbunden mit der Anzahl der zu verändernden Anlagen- und Prozessparameter. Ein sinnvoller Kompromiss zwischen geringem apparativem Aufwand und stets bestmöglich eingestellten Verfahrensparametern in der Wechselwirkungszone ist deshalb notwendig. So werden alle Betrachtungen unter folgenden **Randbedingungen** angestellt:

1. Die realisierten Spurbreiten liegen im feinen Bereich von 0,6 bis 2,4 mm. Größere Strukturen lassen sich in der Regel leicht und erheblich schneller durch eine spanende Bearbeitung herstellen.
2. Für eine einfacheren Datenaufbereitung und Prozessführung beim schichtweisen Aufbau eines Bauteils werden – unabhängig von der Spurbreite – stets konstante Spurhöhen (Schichthöhen) angestrebt. Diese sind typischerweise einige zehntel Millimeter hoch.
3. Es wird stets mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit gearbeitet. Dadurch wird die Integrierbarkeit in unterschiedliche Handhabungssysteme erleichtert, es ergeben sich jedoch mit variierendem Strahldurchmesser verschiedene Wechselwirkungszeiten.

Es ist offensichtlich, dass unter diesen Voraussetzungen ein optimierter Prozess, der durch ideale Verhältnisse in der Wechselwirkungszone zum Beispiel hinsichtlich Pulverausnutzung,

Geschwindigkeit oder Energieeinsatz charakterisiert ist, nicht erwartet werden kann. Vielmehr läuft der Generierungsprozess hier zwar stabil, nicht aber im Effektivitäts-Optimum ab. Die Definition *optimaler Prozessparameter* orientiert sich in dieser Arbeit also in erster Linie an der **Formtreue** und der **Materialqualität** des Bearbeitungsergebnisses.

Um stets konstante Spurböden zu erzeugen, muss die pro Flächeneinheit aufgebrauchte **Zusatzwerkstoffmasse** konstant sein. In der gewählten Anlagenkonfiguration mit unidirektionaler Pulverzufuhr besteht über einen weiten Bereich ein linearer Zusammenhang zwischen Laserstrahldurchmesser (Spurbreite) und tatsächlich für den Prozess aufgeschmolzenem Pulvermassenstrom, so dass eine aktive Anpassung des geförderten Massenstroms an den variierenden Laserstrahldurchmesser nicht notwendig ist.

Für eine Prozesscharakterisierung während der instationären Phase nach dem Einschaltzeitpunkt des Laserstrahls wurden **Hochgeschwindigkeitsaufnahmen** angefertigt und charakteristische Zeitpunkte für eine Vorschubgeschwindigkeit von 600 mm/min abgeleitet. Es wird sichtbar, dass bei den eingesetzten Leistungsdichten kein Aufschmelzen des verwendeten Eisenbasispulvers auf seinem Weg von der Pulverdüse in das Schmelzbad stattfindet. Auch kann bei Folgespuren eine wesentliche Verkipfung der Schmelzbadnormalen von bis zu 90° beobachtet werden, die maßgeblich die Dauer des instationären Zustands im Verlauf des Spurstarts bestimmt. Ferner lassen die Beobachtungen einige **prinzipielle Schlussfolgerungen für die Bearbeitungsstrategie** zu, um die instationären Prozesszeiten und damit die Abweichungen der Spurgeometrien von den Sollquerschnitten zu minimieren:

- Um den Versatz des Startpunkts einer Spur auf ebenem Grundmaterial zu minimieren, kann der Laserstrahl bereits an einem früheren Punkt zugeschaltet werden. Die vorzuhaltende Länge liegt unter den gegebenen Bedingungen bei 35 bis 44 % des Laserstrahldurchmessers. Wirksam ist auch eine schnelle Erzeugung einer initialen Schmelzzone durch die Einstellung einer hohen Leistungsdichte bei kleinem Strahldurchmesser und anschließend schneller Korrektur dieser Größen auf die angemessenen Werte der gewünschten Sollkontur.
- Um die die Startphase von Folgespuren verzögernde Verkipfung der Schmelzbadfront zu minimieren, ist das vorangehende Abfräsen einer oberen Materialschicht sehr wirksam. Dadurch werden an den Konturkanten ähnlich gute Bedingungen für die Folgeschicht geschaffen wie bei ebenem Grundmaterial.
- Die an den Konturkanten durch verminderte Wärmeableitung hervorgerufenen Wärmestauereffekte und die daraus resultierenden Spurverbreiterungen lassen sich durch die Anpassung der Laserleistung – zum Beispiel durch Einsatz einer Laserleistungsregelung – wirksam verringern.

Nach diesen prinzipiellen Betrachtungen wurde das **Konzept eines modularen Fertigungssystems** vorgestellt. Damit ist es möglich, je nach Werkstoff, geometrischer Komplexität und funktionalen Eigenschaften einer spezifischen Teilefamilie verschiedene Komponenten aus einem „Baukasten“ zu einem passenden Fertigungssystem zusammenzustellen. Als Plattformen bzw. Handhabungssysteme können dabei jeweils Dreh- oder Fräszentren, umformtechnische Anlagen oder Roboterzellen zum Einsatz kommen, die unter relativ geringem Aufwand mit Bearbeitungsoptiken und Zuführungen von Schutz- und Bearbeitungsgasen sowie Zusatzwerkstoff im Arbeitsraum ausgerüstet werden können. So lassen sich Anlagen realisieren, die

ohne aufwändig vorzubereitende Werkzeuge (zum Beispiel Gussformen) und ohne Rüstzeiten beliebige Bearbeitungsfolgen von ausgewählten konventionell spanenden und laserbasierten Verfahren beherrschen und damit Bauteile mit geometrischen und funktionalen Eigenschaften (zum Beispiel Stoffeigenschaftsänderungen) in möglichst wenigen Aufspannungen fertigen können.

Dieses Baukastenprinzip wurde anhand einer **beispielhaften Realisierung in einer Laboranlage** erläutert. Als Basis kamen dabei ein Dreh- und ein Fräszentrum zum Einsatz. Angebunden ist ein Leitrechner, der untergeordnete Module wie die variable Laserbearbeitungsoptik, den Pulverförderer und die Laserstrahlquelle steuert. Ergänzt wird das System durch Sensormodule für Temperaturregelung und Schichthöhenkontrolle. Die besondere Eigenschaft der einzelnen Module besteht darin, dass sie als untergeordnete Systeme eine definierte Schnittstelle und – durch eine jeweils eigene Steuereinheit – eine gewisse „Intelligenz“ und weitgehende Selbständigkeit besitzen. Gemäß dem Baukastenprinzip ist das komplexe Gesamtsystem damit in einfachere Subsysteme aufgeteilt. Die Steuerprogramme bestehen dabei weitgehend aus mehrfach verwendeten objektorientiert programmierten Softwaremodulen.

Neben der **Laserstrahlquelle**, die aus einem fasergekoppelten Festkörper- oder Diodenlaser besteht, und einem **Pulverfördersystem** ist das für das Lasergenerieren wichtigste Modul die **variable Laserbearbeitungsoptik**. Sie bietet einen stufenlos steuerbaren Abbildungsmaßstab von 1:1 bis 4:1, was unter Verwendung einer Standard-Glasfaser mit 0,6 mm Kerndurchmesser einen Strahldurchmesser auf dem Werkstück von ca. 0,6 bis 2,4 mm ergibt. Dabei bleibt die von der Glasfaser herrührende homogene Leistungsdichteverteilung stets erhalten und der Arbeitsabstand konstant.

Ein Temperatursensor auf der Basis einer Fotodiode als Kern des Moduls zur **Laserleistungsregelung** wurde vorgestellt. Die Modellierung und Analyse der – in der gegebenen Konfiguration je nach Schmelzbadtemperatur und -größe – zu einem entsprechenden Sensorsignal führenden detektierten Strahlung erlaubt folgende Feststellungen:

- Die detektierte Strahlungsleistung stammt im Wesentlichen aus den im Schmelzbad auftretenden Maximaltemperaturen, periphere Flächenteile des Messfelds mit Temperaturen unterhalb 1100 °C beeinflussen das Sensorsignal nur minimal.
- Mit zunehmendem Strahl- und damit Schmelzbadurchmesser nimmt die detektierte Strahlungsleistung stetig zu. Die Verwendung des Sensorsignals als Eingangsgröße in einem Regelkreis ist daher sinnvoll möglich.

Für die **Schichtdickenregelung** wurde ein berührungsloses Messsystem der Firma *LaserTec* vorgestellt. Dieser passive Sensor beruht auf einer speziellen Art der Triangulation. Trotz der erschwerten Bedingungen durch hochdynamische Vorgänge in der Schmelzbadoberfläche und Abschattung bzw. Streuung durch die Pulverpartikel gelingt damit eine on-line-Messung entstehender Spuren mit 0,7 mm Breite, die um maximal $\pm 50 \mu\text{m}$ von der mit dem Tastschnittverfahren ermittelten Endkontur abweicht.

Den Abschluss der Ausführungen bilden einige beispielhafte Bauteile, die auf den beschriebenen Fertigungssystemen aus Fräs- und Drehzentrum hergestellt werden können. Hierzu wur-

den alternierende Verfahrensfolgen aus Lasergenerieren und Spanen sowie der Einsatz von Strahldurchmesservariation, Laserleistungsregelung und Schichtdickenmessung aufgezeigt.

Literaturverzeichnis

- [1] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser*. Stuttgart: Teubner, 1992.
- [2] GEBHARDT, A.: *Rapid Prototyping: Werkzeug für die schnelle Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 1996.
- [3] VOLLRATH, K.: *Selektives Lasersintern reift zum Fertigungsverfahren*. Form und Werkzeug **11** (2002) Nr. 1, S. 37.
- [4] KÖTH, C.-P.: *Direkt zum fertigen Produkt*. Automobil Industrie **48** (2003) Nr. 1/2, S. 62.
- [5] FRITZ, E.: *Laser sintering innovations*. Advanced Materials & Processes **161** (2003) Nr. 1, S. 56.
- [6] N. N.: *Per Laser ohne Umwege zum fertigen Bauteil*. Industrieanzeiger **125** (2003) Nr. 3, S. 34.
- [7] WIEDMAIER, M.: *Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklung zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren*. Laser in der Materialbearbeitung. Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: Teubner, 1997.
- [8] GNANAMUTHU, D. S.: *Cladding*. Patentschrift US 3 95 21 80, 1976.
- [9] WEERASINGHE, V. M.; STEEN, W. M.: *Laser cladding with pneumatic powder feed*. Proc. 4th int. Conf. on Laser Processing, Los Angeles, 1983.
- [10] MACINTYRE, R. M.: *Laser hard surfacing of turbine blade shroud interlocks*. In: METZBOWER, E. A. (Hrsg.): Proceedings of the materials processing symposium: ICALEO 83. Toledo, OH: American Society for Metals, 1983, S. 230-239.
- [11] SHEN, J.: *Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr*. Laser in der Materialbearbeitung. Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: Teubner, 1994.
- [12] GRÜNENWALD, B.: *Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser*. Laser in der Materialbearbeitung. Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: Teubner, 1996.
- [13] VOLZ, R.: *Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern*. Laser in der Materialbearbeitung. Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: Teubner, 1998.
- [14] STEEN, W. M.: *Laser surface cladding*. In: DRAPER, C. W.; MAZZOLDI, P. (Hrsg.): Laser Surface Treatment of Metals. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers Group, 1985, S. 369-387.
- [15] HOFFMANN, E.: *Herstellung metallischer Bauteile durch Laserstrahlgenerieren*. Aachen: Shaker, 1998.
- [16] GREMAUD, M.; WAGNIÈRE, J.-D.; ZRYD, A.; KURZ, W.: *Laser metal forming – process fundamentals*. Surface Engineering **12** (1996) Nr. 3, S. 251-259.
- [17] MURPHY, M. L.; LEE, C.; STEEN, W. M.: *Studies in rapid prototyping by laser surface cladding*. In: Proc. of the Int. Conf. of Lasers and Electro-Opt. ICALEO'93, 24.-

28. Okt. 1993, Orlando. Orlando: Laser Institute of America, 1993, S. 882-892.
- [18] KOCH, J. L.; MAZUMDER, J.: *Rapid prototyping by laser cladding*. In: Proc. of the Int. Conf. of Lasers and Electro-Opt. ICALEO'93, 24.-28. Okt. 1993, Orlando. Orlando: Laser Institute of America, 1993, S. 556-565.
- [19] KÖNIG, W.; CELIKER, T.; HERFURTH, H.-J.: *Approaches to prototyping of metallic parts*. In: DICKENS, P. M. (Hrsg.): Proc. of the 2nd European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 15.-16. Juli 1993, Nottingham (England). Nottingham: University of Nottingham, 1993, S. 304.
- [20] IRVING, R.: *Taking a powder*. American Society of Mechanical Engineers (ASME): Mechanical Engineering Magazine Online, Sept. 1999 (<http://www.memagazine.org/backissues/september99/features/powder/powder.html>).
- [21] MURPHY, M. L.: *Rapid prototyping by laser surface cladding*. Liverpool University, Dissertation, 1995.
- [22] MURPHY, M. L.; STEEN, W. M.; LEE, C.: *The rapid manufacture of metallic components by laser surface cladding*. In: GEIGER, M.; VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering. (Proc. of the LANE'94, 12.-14. Oct. 1994, Erlangen). Bamberg: Meisenbach, 1994, S. 803-814.
- [23] LIN, J.; STEEN, W. M.: *Design characteristics and development of a nozzle for coaxial laser cladding*. Journal of Laser Applications **10** (1998) Nr. 2, S. 55.
- [24] STEEN, W. M.; MCLEAN, M. A.; SHANNON, G. J.: *Shaping by laser cladding*. In: GEIGER, M.; VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Proc. of the LANE'97, 24.-26. Sept. 1997, Erlangen). Bamberg: Meisenbach, 1997, S. 115-127.
- [25] MCLEAN, M. A.; SHANNON, G. J.; STEEN, W. M.: *Moldless casting by laser*. In: AHLERS, R.-J.; REINHART, G. (Hrsg.): Rapid Prototyping and Flexible Manufacturing. SPIE Vol. 3102 (1997), S. 131-141.
- [26] HAMMEKE A. W.: *Laser spray nozzle and method*. Patentschrift US 4 72 42 99, 1988.
- [27] KOCH, J. L.; HETZNER, D.; MAZUMDER, J.: *A metallurgical analysis of laser-clad H13*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'96, 14.-17. Okt. 1996, Detroit. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1996, S. A143-A150.
- [28] MORGAN, D.; MAZUMDER, J.; SKSZEK, T. W.: *Fabrication of customized, composite, and alloy-variant components using closed-loop direct metal deposition*. Patentschrift US 20 02 14 21 07, 2002.
- [29] MAZUMDER, J.; CHOI, J.; NAGARATHNAM, K.; KOCH, J. L.; HETZNER, D.: *The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-d components*. JOM – Journal of the Minerals Metals & Materials Society Vol. 49 (1997) Nr. 5, S. 55-60.
- [30] MAZUMDER, J.; SCHIFFERER, A.; CHOI, J.: *Direct materials deposition: designed macro and microstructure*. Materials Research Innovations **3** (1999) Nr. 3, S. 118-131.
- [31] VASILASH, G. S.: *Parts without machining & lasers without lamps: new developments for advanced manufacturing*. Automotive Manufacturing & Production 1999 Nr. 5 (<http://www.autofieldguide.com/articles/059804.html>).
- [32] MAZUMDER, J.; VOELKEL, D.: *Method and apparatus for noncontact surface contour measurement*. Patentschrift US 5 44 65 49, 1995.
- [33] KOCH, J. L.; MAZUMDER, J.: *Apparatus and methods for monitoring and controlling multi-layer laser cladding*. Patentschrift US 6 12 25 64, 2000.
- [34] MAZUMDER, J.: *In-situ stress monitoring during direct material deposition process*.

- Patentschrift US 6 55 32 75, 2003.
- [35] KLOCKE, F.; CELIKER, T.; SONG, Y.-A.: *Rapid metal tooling*. In: Dickens, P. M. (Hrsg.): Proc. of the 4th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 13.-15. Juni 1995, Belgirate (Italien). Nottingham: University of Nottingham, 1995, S. 225-245.
- [36] KLOCKE, F.; CLEMENS, U.: *Rapid tooling combining laser generating and high speed milling*. In: DICKENS, P. M. (Hrsg.): Proc. of the 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 4.-6. Juni 1996, Helsinki (Finland). Nottingham: University of Nottingham, 1996, S. 211-221.
- [37] KLOCKE, F.; MEINERS, W.: *Direct manufacturing of metal prototypes and prototype tools*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 7th Solid Freeform Fabrication Symposium, 12.-14. August 1996, Austin. Austin: The University of Texas, 1996, S. 141-148.
- [38] KLOCKE, F.; CLEMENS, U.: *Verfahrenskombination aus Fräsen und Laserauftragschweißen zum Fertigen von Spritzgußwerkzeugen*. Maschinenmarkt **103** (1997) Nr. 18, S. 32-34.
- [39] GRUBER, F. J.: *Diodenlaser zum Auftragsschweißen*. EuroLaser (1999) Nr. 2, S. 38-40.
- [40] VOLLRATH, K.: *Werkzeugreparatur per Laser spart Zeit und senkt Kosten*. Düsseldorf: VDI-Nachrichten **54** (2000) Nr. 15.
- [41] KLOCKE, F.; KORDT, M.: *Wieder fit gemacht – Automatisierte Reparaturzelle für den Werkzeug- und Formenbau in der Umformtechnik*. Maschinenmarkt **110** (2004) Nr. 43, S. 38-40.
- [42] GERKEN, J.; HAFERKAMP, H.; SCHMIDT, H.: *Rapid prototyping/manufacturing of metal components by laser cladding*. In: Proc. of the 27th International Symposium on Automotive Technologies and Automation (ISATA). Aachen: 1994, S. 85-91.
- [43] GERKEN, J.: *Rapid Prototyping/Manufacturing metallischer Komponenten durch 3D-Laserstrahl-Pulver-Auftragschweißen*. LZH Aktuell Nr. 9, 1994. Hannover: Laser Zentrum Hannover, 1994.
- [44] HAFERKAMP, H.; BACH, F.-W.; GERKEN, J.; MARQUERING, M.: *Rapid manufacturing direct production of metal parts with laser radiation*. In: DICKENS, P. M. (Hrsg.): Proc. of the 4th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Juni 1995, Belgirate (Italien), S. 123-135.
- [45] HAFERKAMP, H.; ALVENSLEBEN, F.; GERKEN, J.: *Rapid Manufacturing durch Lasersintern und 3D-Laserstrahl-Auftragschweißen*. Laser und Optoelektronik **27** (1995) Nr. 3, S. 64.
- [46] HAFERKAMP, H.; BACH, F.-W.; GERKEN, J.: *Prozeßführung bei der Formgebung metallischer Strukturen mittels 3D-Laserstrahl-Auftragschweißen, Teil 1*. Laser Magazin (1997) Nr. 1, S. 21-25.
- [47] HAFERKAMP, H.; BACH, F.-W.; GERKEN, J.: *Prozeßführung bei der Formgebung metallischer Strukturen mittels 3D-Laserstrahl-Auftragschweißen, Teil 2*. Laser Magazin (1997) Nr. 2, S. 16-20.
- [48] KREUTZ, E. W.; BACKES, G.; GASSER, A.; WISSENBACH, K.: *Rapid prototyping with CO₂ laser radiation*. Applied Surface Science **86** (1995) S. 310-316.
- [49] HOFFMANN, E.; BACKES, G.; GASSER, A.; KREUTZ, E. W.; STROMEYER, R.; WISSENBACH, K.: *Prozeßüberwachung durch Temperaturregelung beim Generieren mit*

- CO₂-Laserstrahlung*. Laser und Optoelektronik 28 (1996) Nr. 3, S. 59.
- [50] BACKES, G.; KREUTZ, E. W.; GASSER, A.; HOFFMANN, E.; WISENBACH, K.; POPRAWA, R.: *Near neat-shape reconditioning and manufacturing of tools and machine parts using laser cladding and generating*. In: GEIGER, M.; VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): *Laser Assisted Net Shape Engineering* (Proc. of the LANE'97, 24.-26. Sept. 1997, Erlangen). Bamberg: Meisenbach, 1997, S. 747-756.
- [51] MERZ, R.; PRINZ, F. B.; RAMASWAMI, K.; TERK, M.; WEISS, L. E.: *Shape deposition manufacturing*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): *Proc. of the 5th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 8.-10. August 1994, Austin. Austin: The University of Texas, 1994, S. 1-8 (<http://www-rpl.stanford.edu/files/paper/1994/sff1994a/sff1994a.html>).
- [52] MERZ, R.: *Shape deposition manufacturing*. Technischen Universität Wien, Dissertation, 1994 (http://www-rpl.stanford.edu/files/thesis/thesis_rmerz.pdf).
- [53] FESSLER, J. R.; MERZ, R.; NICKEL, A. H.; PRINZ, F. B.; WEISS, L. E.: *Laser deposition of metals for shape deposition manufacturing*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): *Proc. of the 7th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 12.-14. August 1996, Austin. Austin: The University of Texas, 1996, S. 117-124 (<http://www-rpl.stanford.edu/files/paper/1996/sff1996a.pdf>).
- [54] FESSLER, J. R.; NICKEL, A. H.; LINK, G.; PRINZ, F. B.: *Functional gradient metallic prototypes through shape deposition manufacturing*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): *Proc. of the 8th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 11.-13. August 1997, Austin. Austin: The University of Texas, 1997, S. 521-528 (<http://www-rpl.stanford.edu/files/paper/1997/sff1997a.pdf>).
- [55] COOPER, A. G.; KANG, S.; KIETZMAN, J. W.; PRINZ, F. B.; LOMBARDI, J. L.; WEISS, L. E.: *Automated fabrication of complex molded parts using Mold SDM*. In: MARCUS, H. L. et al. (Hrsg.): *Proc. of the 9th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 10.-12. August 1998, Austin. Austin: The University of Texas, 1998, S. 721-728 (<http://www-rpl.stanford.edu/files/paper/1998/sff1998.pdf>).
- [56] KANG, S.; COOPER, A. G.; STAMPFL, J.; PRINZ, F. B.; LOMBARDI, J. L.; WEISS, L. E.; SHERBECK, J.: *Fabrication of high quality ceramic parts using Mold SDM*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): *Proc. of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 9.-11. August 1999, Austin. Austin: The University of Texas, 1999, S. 427-434 (<http://www-rpl.stanford.edu/files/paper/1999/sff1999a.pdf>).
- [57] RAMASWAMI, K.: *Process planning for shape deposition manufacturing*. Stanford University, Dissertation, 1997 (http://www-rpl.stanford.edu/files/thesis/thesis_kramaswami.pdf).
- [58] KAO, H.-J.: *Process planning for additive/subtractive solid freeform fabrication using medial axis transform*. Stanford University, Dissertation, 1999 (http://www-rpl.stanford.edu/files/thesis/thesis_jkao.pdf).
- [59] KAR, A.; MUKHERJEE, A.: *Design rules and digital interface for laser-aided direct rapid prototyping (LADRP)*. In: *Proc. of the National Science Foundation Workshop on Design Methodologies for Solid Freeform Fabrication*, 1995.
- [60] KAHLEN, F.-J.; VON KLITZING, A.; KAR, A.: *Hardness, chemical and microstructural studies for laser-fabricated metal parts of graded materials*. In: *Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'99*, 15.-18. Nov. 1999, San Diego. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. F129-F137.
- [61] FRANCESCHINI, R.; NAPRAVNIK, L.; MUKHERJEE, A.; SANKARANARAYANAN, S.;

- KAR, A.: *Laser aided direct rapid prototyping*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 8th Solid Freeform Fabrication Symposium, 11.-13. August 1997, Austin. Austin: The University of Texas, 1997, S. 41-48.
- [62] GÄUMANN, M.; JOUINEAU, P.-H.; WAGNIÈRE, J.-D.; KURZ, W.: *Epitaxial laser metal forming on a single crystal superalloy*. In: GEIGER, M.; VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Proc. of the LANE'97, 24.-26. Sept. 1997, Erlangen). Bamberg: Meisenbach, 1997, S. 651-657.
- [63] GÄUMANN, M.: *Epitaxial laser metal forming of a single crystal superalloy*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Dissertation (Nr. 1907), 1999.
- [64] BIELER, H.-W.; BAUMANN, R.; FRITSCH, B.; GÄUMANN, M.: *Einkristalle reparieren*. Winterthur: Sulzer Technical Review, Nr. 2, 1997, S. 38.
- [65] PETERS, J. A.; SCHLÄPFER, H.-W.: *Beyond the surface*. In: ROBINSON, T. (Hrsg.): Prototyping Technology International 1998. Dorking: UK & International Press, 1998, S. 154-157.
- [66] KRAUSE, S.: *Ein fortschrittliches Reparaturverfahren: Laser-Pulverauftragsschweißen*. In: Sulzer Technical Review 4/2001 (http://www.sulzer.com/com/NewsAndMedia/TechnicalReview/Archive/2001_04_Krause_d.pdf)
- [67] MATTHEIJ, S.; HENDRIKS, M.: *Laserschweißen von Gasturbinenteilen*. In: Sulzer Technical Review, 1/2004 (http://www.sulzer.com/com/NewsAndMedia/TechnicalReview/Archive/2004_1_Mattheij_d.pdf).
- [68] NOWOTNY, S.; FUX, V.; REITZENSTEIN, W.: *Mechanische Eigenschaften und Struktur von lasergenerierten Körpern aus austenitischen und Schnellarbeitsstählen*. In: DAUSINGER, F. et al. (Hrsg.): Proc. of the 6th Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Stuttgart. Wiesbaden: AWT, 1996, S. 887-895.
- [69] BEYER, E.; NOWOTNY, S.; SCHAREK, S.; FUX, V.: *Rapid Prototyping und Freiformflächenschichtung durch 3D-Laser-Auftragsschweißen von Metalllegierungen*. Abschlussbericht zum BMBF-Rahmenkonzept „Produktion 2000“. Dresden: Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, 1997 (<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e001/24240782X.pdf>).
- [70] NOWOTNY, S.; LÖSCHAU, W.; TANGERMANN, K.; SCHAREK, S.; BEYER, E.: *Direct metal and ceramic prototyping by laser built-up welding and selective laser sintering*. New Materials and Development Processes, Proceedings of the 1999 Global Powertrain Congress, David M. Roessler Verlag, S. 13-19.
- [71] NOWOTNY, S.; SCHAREK, S.; KEMPE, F.; BEYER, E.: *COAXn: Modular system of powder nozzles for laser beam build-up welding* (Poster-Präsentation). In: Proc. 22. Int. Congress on Application of Lasers & Electro-Optics (ICALEO03), 13.-16. Okt. 2003, Jacksonville, Florida, USA. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2003, CD-ROM.
- [72] NOWOTNY, S.; SCHAREK, S.; NAUMANN, T.: *Integrated machine tool for laser beam cladding and freeforming*. In: International Thermal Spray Conference (ITSC), 5.-8. Mai 2003, Orlando, Florida, USA. Materials Park: ASM Thermal Spray Society, 2003, S. 629-631
- [73] LEWIS, G. K.; LESS, R. M.: *Deposition head for laser*. Patentschrift US 5 96 18 62, 1999.
- [74] LEWIS, G. K.; MILEWSKI, J. O.; CREMERS, D. A.; NEMEC, R. B.; BARBE, R. B.: *Laser production of articles from powders*. Patentschrift US 5 83 79 60, 1998.

- [75] THOMA, D. J.; CHARBON, C.; LEWIS, G. K.; NEMEC, R. B.: *Directed light fabrication of iron-based materials*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 7th Solid Freeform Fabrication Symposium, 12.-14. August 1996, Austin. Austin: The University of Texas, 1996, S. 341-346.
- [76] MAH, R.: *Directed light fabrication*. Advanced Materials & Processes Vol. 151 (1997) Nr. 3, S. 31-33.
- [77] MILEWSKI, J. O.; LEWIS, G. K.; THOMA, D. J.; KEE, G. I.; NEMEC, R. B.; REINERT, R. A.: *Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition*. Journal of Materials Processing Technology Vol. 75 (1998) Nr. 1/3, S. 165-172.
- [78] MILEWSKI, J. O.; DICKERSON, P. G.; NEMEC, R. B.; LEWIS, G. K.; FONSECA, J. C.: *Application of a manufacturing model for the optimization of additive processing of Inconel alloy 690*. Journal of Materials Processing Technology Vol. 91 (1999) Nr. 1/3, S. 18-28.
- [79] XUE, L.; ISLAM, M. U.: *Free-form laser consolidation for producing functional metallic components*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'98, 16.-19. Nov. 1998, Orlando. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. E15-E24.
- [80] XUE, L.; CHEN, J.-Y.; ISLAM, M. U.: *The properties of free-form laser consolidated Stellite 6 alloy*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'99, 15.-18. Nov. 1999, San Diego. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. F172-F181.
- [81] ARCELLA, F. G.; WHITNEY, E. J.; KRANTZ, D. G.: *Laser forming near shapes in Titanium*. In: MAZUMDER, J.; MATSUNAWA, A.; MAGNUSSON, C. (Hrsg.): Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'95, 13.-16. Nov. 1996, San Diego. Orlando: Laser Institute of America, 1995, S. 1068-1077.
- [82] HOUSE, M. A., WHITNEY, E. J., KRANTZ, D. G., ARCELLA, F. G.: *Rapid laser forming of titanium near shapes articles: LaserCast*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 7th Solid Freeform Fabrication Symposium, 12.-14. August 1996, Austin. Austin: The University of Texas, 1996, S. 239-248.
- [83] MEINERT, K. C.; WHITNEY, E. J.: *Laser freeforming of Nickel-Aluminum Bronze*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'99, 15.-18. Nov. 1999, San Diego. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. F148-F157.
- [84] WWW-Seiten der Applied Physics Laboratories (APL), Johns Hopkins University, Laurel, USA (<http://www.jhuapl.edu/rc/mat/index.html>).
- [85] WWW-Seiten der Firma MTS Systems Corporation, Eden Prairie, USA (http://www.mts.com/aesd/laser_material.htm).
- [86] ARCELLA, F. G.; ABBOTT, D. H.; HOUSE, M. A.: *Titanium alloy structures for airframe application, by the laser forming process*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2000 (<http://www.aerometcorp.com/pdf/aiaaar.pdf>).
- [87] GRIFFITH, M. L.; KEICHER, D. M.; ATWOOD, C. L.; ROMERO, J. A.; SMUGERESKY, J. E.; HARWELL, L. D.; GREENE, D. L.: *Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 7th Solid Freeform Fabrication Symposium, 12.-14. August 1996, Austin. Austin: The University of Texas, 1996, S. 125-131.
- [88] GARCIA, N.: *Novel laser net shaping approach reduces time for fabricating parts*.

- Sandia National Laboratories: Sandia LabNews, 7. Nov. 1997 (http://www.sandia.gov/LabNews/LN11-07-97/lens_story.html).
- [89] VASINONTA, A.; BEUTH, J.; GRIFFITH, M. L.: *Process maps for laser deposition of thin-walled structures*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium, 9.-11. August 1999, Austin. Austin: The University of Texas, 1999, S. 383-391.
- [90] HOFMEISTER, W. H.; WERT, M. J.; SMUGERESKY, J. E.; PHILLIBER, J. A.; GRIFFITH, M. L.; ENSZ, M. T.: *Investigating solidification with the laser-engineered net shaping (LENS) process*. JOM-e, **51** (1999) Nr. 7 (<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9907/Hofmeister/Hofmeister-9907.html>).
- [91] GRIFFITH, M. L.; SCHLIENGER, M. E.; HARWELL, L. D.; OLIVER, M. S.; BALDWIN, M. D.; ENSZ, M. T.; SMUGERESKY, J. E.; ESSIEN, M.; BROOKS, J.; ROBINO, C. V.; HOFMEISTER, W. H.; WERT, M. J.; NELSON, D. V.: *Thermal behavior in the LENS process*. In: MARCUS, H. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 9th Solid Freeform Fabrication Symposium, 10.-12. August 1998, Austin. Austin: The University of Texas, 1998, S. 89-96.
- [92] GRIFFITH, M. L.; HARWELL, L. D.; ROMERO, J. A.; SCHLIENGER, M. E.; ATWOOD, C. L.; SMUGERESKY, J. E.: *Multi-material processing by LENS*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 8th Solid Freeform Fabrication Symposium, 11.-13. August 1997, Austin. Austin: The University of Texas, 1997, S. 387-393.
- [93] BROOKS, J.; ROBINO, C. V.; HEADLEY, T.; GOODS, S.; GRIFFITH, M. L.: *Microstructure and property optimization of LENS deposited H13 tool steel*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium, 9.-11. August 1999, Austin. Austin: The University of Texas, 1999, S. 375-382.
- [94] SINGER, N.: *Intense hopes: Ten companies team to commercialize Sandia's powder-to-parts net shaping technology*. Sandia National Laboratories: Sandia LabNews, 5. Dez. 1997 (http://www.sandia.gov/LabNews/LN12-05-97/lens_story.html).
- [95] ATWOOD, C. L.; GRIFFITH, M. L.; HARWELL, L. D.; SCHLIENGER, M. E.; ENSZ, M. T.; SMUGERESKY, J. E.; ROMERO, J. A.; GREENE, D. L.; RECKAWAY, D. E.: *Laser engineered net shaping (LENS): A tool for direct fabrication of metal parts*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'98, 16.-19. Nov. 1998, Orlando. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. E1-E7.
- [96] SWANN, T. A.; KEICHER, D. M.; MILLER, W. D.: *Laser engineered net shaping (LENS) technology commercialization*. In: Proc. Rapid Prototyping and Manufacturing, 19.-21. Mai 1998, Dearborn. Dearborn: The Society of Manufacturing Engineers (SME), 1998, S. 752-757.
- [97] GRYLLS, R.: *Laser engineered net shapes*. Advanced Materials & Processes **161** (2003) Nr. 1, S. 45.
- [98] KEICHER, D. M.; LOVE, J.; MILLER, W. D.; SMUGERESKY, J. E.: *Direct fabrication of multiple material systems – beginning to understand the issues associated with this technology advancement*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'99, 15.-18. Nov. 1999, Orlando. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. F122-F128.
- [99] *Optomec LENS Model 750 specification sheet*. Produktinformation der Firma *Optomec Design Company*, Albuquerque (USA), 1999.
- [100] *Optomec LENS Model 850 specification sheet*. Produktinformation der Fir-

- ma *Optomec Design Company*, Albuquerque (USA), 2002 (<http://www.optomec.com/downloads/Optomec-LENS-850-System.pdf>).
- [101] BRICE, C. A.; SCHWENDNER, K. I.; MAHAFFEY, D. W.; MOORE, E. H.; FRASER, H. L.: *Process variable effects on laser deposited Ti-6Al-4V*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium, 9.-11. August 1999, Austin. Austin: The University of Texas, 1999, S. 369-374.
- [102] NOECKER, F. F.; DUPONT, J. N.: *Functionally graded copper-steel using laser engineered net shaping process*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium, 5.-7. August 2002, Austin. Austin: The University of Texas, 2002, S. 231-238.
- [103] KUNZE, J. M.; GIGERENZER, H.; HU, C.; FEELEY, T.: *Laser fabrication of discontinuously reinforced metal components*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'99, 15.-18. Nov. 1999, Orlando. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. F182-F188.
- [104] GRIFFITH, M. L.; ENSZ, M. T.; GREENE, D. L.; RECKAWAY, D. E.; ROMERO, J. A.; CRENSHAW, T. B.; HARWELL, L. D.; BUCHHEIT, T. E.; TIKARE, V.: *Solid freeform fabrication using the Wirefeed Process*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium, 9.-11. August 1999, Austin. Austin: The University of Texas, 1999, S. 529-536.
- [105] RABINOVICH, J.: *Net shape manufacturing with metal alloys*. *Advanced Materials & Processes* **161** (2003) Nr. 1, S. 47.
- [106] WWW-Seiten der Firma *H&R Technology Inc.*, Lowell, USA (<http://www.hrtechnology.com>).
- [107] WWW-Seiten der University of Birmingham, School of Metallurgy and Materials, Birmingham, UK (<http://www.bham.ac.uk/metallurgy/research/prototyping.html>).
- [108] SRIVASTAVA, D.; HU, D.; CHANG, I. T. H.; LORETTO, M. H.: *The influence of thermal processing route on the microstructure of some TiAl-based alloys*. *Intermetallics* **7** (1999) Nr. 10, S. 1107-1112.
- [109] LIU, F. W.; CHOI, J.; LANDERS, R. G.; JANARDHAN, V.; BALAKRISHNAN, S. N.; AGARWAL, S.: *Research and development of a hybrid rapid manufacturing process*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium, 6.-8. August 2001, Austin. Austin: The University of Texas, 2001, S. 138-145 (<http://web.umn.edu/~landersr/PAPERS/SFF01a.pdf>).
- [110] BODDU, M. R.; LANDERS, R. G.; MUSTI, S.; AGARWAL, S.; RUAN, J.Z.; LIU, F. W.: *System integration and realtime control architecture of a laser aided manufacturing process*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium, 5.-7. August 2002, Austin. Austin: The University of Texas, 2002, S. 522-529 (<http://web.umn.edu/~landersr/PAPERS/SFF02a.pdf>).
- [111] BODDU, M. R.; MUSTI, S.; LANDERS, R. G.; AGARWAL, S.; LIU, F. W.: *Empirical modeling and vision based control for the laser metal deposition process*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium, 6.-8. August 2001, Austin. Austin: The University of Texas, 2001, S. 452-459 (<http://web.umn.edu/~landersr/PAPERS/SFF01b.pdf>).
- [112] BODDU, M. R.; LANDERS, R. G.; LIU, F. W.: *Control of laser cladding processes for rapid prototyping - a review*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium, 6.-8. August 2001, Austin. Austin: The University

- of Texas, 2001, S. 460-467 (<http://web.umn.edu/landersr/PAPERS/SFF01c.pdf>).
- [113] HU, D.; KOVACEVIC, R.; VALANT, M.: *Solid freeform fabrication of metal parts by 3d laser cladding*. In: Proc. of the 2000 International Mechanical Engineering Congress, 5.-10. Nov. 2000, Orlando (FL), USA.
- [114] HU, D.; KOVACEVIC, R.: *Closed loop control of 3d laser cladding based on infrared image sensing*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium, 6.-8. August 2001, Austin. Austin: The University of Texas, 2001, S. 129-137.
- [115] HU, D.; MEI, H.; KOVACEVIC, R.: *Improving solid freeform fabrication by laser based additive manufacturing*. In: Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216 (2002), S. 1253-1264.
- [116] HU, D.; KOVACEVIC, R.: *Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, **43** (2003), S. 51-60.
- [117] MEI, H.; VALANT, M.; HU, D. KOVACEVIC, R.: *The characterization of the performance of a new powder feeder for laser based additive manufacturing*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium, 5.-7. August 2002, Austin. Austin: The University of Texas, 2002, S. 448-457.
- [118] PINKERTON, A. J.; LI, L.: *Direct laser deposition layer profiles and the factors affecting them*. Time Compression Technology Conference 2002, Manchester, 16.-17. Okt., Manchester, 2002.
- [119] PINKERTON, A. J.; LI, L.: *The effect of laser pulse width on multiple-layer 316l steel clad microstructure and surface finish*. Appl. Surface Science, Band 208-209 (2003), Nr. 1, S. 411-416.
- [120] PINKERTON, A. J.; LI, L.: *The effect of diode laser beam shape and traverse direction on direct metal deposition process*. In: Proc. 22. Int. Congress on Application of Lasers & Electro-Optics (ICALEO03), 13.-16. Okt. 2003, Jacksonville, Florida, USA. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2003, S. 111-121.
- [121] PINKERTON, A. J.; LI, L.: *Rapid prototyping using direct laser deposition - the effect of powder atomisation type and flow rate*. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture), Band 217 (2003) Nr. 6, S. 741-752.
- [122] PINKERTON, A. J.; LI, L.: *Process characteristics and effects of gas- and water-atomized stainless steel powders in laser-based rapid tooling*. Journal of Laser Applications **15** (2003) Nr. 3, S. 172-178.
- [123] PINKERTON, A. J.; LI, L.: *The significance of deposition point standoff variations in coaxial power feed multiple laser deposition of metals for rapid prototyping*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, Nr. 6 (2004), S. 573-584.
- [124] WOLF, S.; VOLZ, R.: *Einsatz des Laserstrahlbeschichtens beim Bau von Kunststoffverarbeitungsmaschinen*. Laser und Optoelektronik **27** (1995) Nr. 2, S. 47-52.
- [125] KATHURIA, Y. P.; TSUBOI, A.: *Laser cladding of Stellite 6: A detailed analysis*. In: OSBORNE, M. R.; SAYEGH, G. (Hrsg.): High-Power Lasers: Applications and Emerging Applications. SPIE Vol. 2789, 1996, S. 86-92.
- [126] KATHURIA, Y. P.: *The effect of beam interaction time on laser cladding process*. In: Technical Digest Series, Vol. 9, CLEO'96, 2.-7. Juni 1996, California. OSA, 1996, S. 351.
- [127] KATHURIA, Y. P.: *Laser microfabrication of metallic parts*. In: AHLERS, R.-J.; REIN-

- HART, G. (Hrsg.): Rapid Prototyping and Flexible Manufacturing. SPIE Vol. 3102 (1997), S. 112-119.
- [128] KATHURIA, Y. P.: *Metal rapid prototyping via laser cladding/generating process*. In: MORDIKE, B. L. (Hrsg.): Proc. of the Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials, 22.-23. Sept. 1998, Hannover (ECLAT'98). Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, 1998, S. 449-454.
- [129] CHEN, Z. D.; MAI, T. A.; LIM, G. C.: *Rapid tooling by laser cladding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'98, 16.-19. Nov. 1998, Orlando. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. E8-E14.
- [130] PFEIFER, R.: *LAPS-J als generatives Verfahren für Rapid Prototyping*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1994 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 94-18).
- [131] *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping*. 1. Finanzierungsantrag des Sonderforschungsbereichs 374 der Universität Stuttgart, 1994.
- [132] SIGEL, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Integration of the generative LAPS-J process into a CNC turning centre*. In: GEIGER, M.; VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Proc. of the LANE'97, 24.-26. Sept. 1997, Erlangen). Bamberg: Meisenbach, 1997, S. 733-740.
- [133] SIGEL, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.; LIU, Z. F.: *Laser based Rapid Prototyping by process combination*. In: CAMPBELL, R. I. (Hrsg.): Proc. of the 7th European Conf. on Rapid Prototyping and Manufacturing, 7.-9. Juli, Aachen. Nottingham: University of Nottingham, 1998, S. 175-184.
- [134] ROSS, R. B.: *Metallic materials specification handbook*, 4. Auflage. London: Chapman & Hall, 1992.
- [135] DAVE, V.; MATZ, J.; EAGAR, T.: *Electron beam solid freeform fabrication of metal parts*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 6th Solid Freeform Fabrication Symposium, 7.-9. August 1995, Austin. Austin: The University of Texas, 1995, S. 64-71.
- [136] KOVACEVIC, R.; BEARDSLEY, H.: *Process control of 3d welding as a droplet-based rapid prototyping technique*. In: MARCUS, H. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 9th Solid Freeform Fabrication Symposium, 10.-12. August 1998, Austin. Austin: The University of Texas, 1998, S. 57-64.
- [137] DICKENS, P. M.; PRIDHAM, M. S.; COBB, R. C.; GIBSON, I.; DIXON, G.: *3-d welding*. In: DICKENS, P. M. (Hrsg.): Proc. of the 1st European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 6.-7. Juli 1992, Nottingham. Nottingham: University of Nottingham, 1992, S. 81-93.
- [138] RIBEIRO, A. F.; NORRISH, J.: *Rapid prototyping process using metal directly*. In: BOURELL, D. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 7th Solid Freeform Fabrication Symposium, 12.-14. August 1996, Austin. Austin: The University of Texas, 1996, S. 249-256.
- [139] SONG, Y.-A.; PARK, S.; HWANG, K.; CHOI, D.; JEE, H.: *3d welding and milling for direct prototyping of metallic parts*. In: MARCUS, H. L. et al. (Hrsg.): Proc. of the 9th Solid Freeform Fabrication Symposium, 10.-12. August 1998, Austin. Austin: The University of Texas, 1998, S. 495-501.
- [140] GASSMANN, R.: *Technologische Untersuchungen zum Laser-Auftragschweißen verschleißbeanspruchter Bauteile*. Hochschule für Verkehrswesen Dresden, Dissertation, 1989.
- [141] LAGAIN, P.: *Contribution expérimentale aux traitements de surface par laser avec ap-*

- port de poudre*. Université Aix-Marseille, Thèse Doctorat, 1989.
- [142] LI, W.-B.; ENGSTRÖM, H.; POWELL, J.; TAN, Z.; MAGNUSSON, C.: *Redistribution of the beam power in laser cladding by powder injection*. Lasers in Engineering, 1996, Vol. 5, S. 175-183.
- [143] LEMOINE, F.; JOUVARD, J. M.; ANDRZEJEWSKI, H.; GREVEY, D. F.: *Influence of the nature of optical fibers in materials treatment by ND:YAG lasers*. Journal of Materials Processing Technology Vol. 59 (1996) Nr. 4, S. 337-342.
- [144] MARSDEN, C. F.; FRENK, A.; WAGNIÈRE, J.-D.: *Power absorption during the laser cladding process*. In: MORDIKE, B. L.; BERGMANN, H. W. (Hrsg.): Proc. of the Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials 1992, Göttingen (ECLAT'92). Oberursel: DGM, 1992, S. 375-380.
- [145] MARSDEN, C. F.; FRENK, A.; WAGNIÈRE, J.-D.; DEKUMBIS, R.: *Effects of injection geometry on laser cladding*. In: BERGMANN, H. W.; KUPFER, R. (Hrsg.): Proc. of the Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials 1990, Erlangen (ECLAT'90). Coburg: Sprechsaal Publishing Group, 1990, S. 535-542.
- [146] NURMINEN, J. I.; SMITH, J. E.: *Parametric evolutions of laser/clad interactions for hardfacing applications*. Proc. 2nd Int. Conf. Lasers in material processing, Los Angeles, Jan. 1983, S. 94-106.
- [147] RUDLAFF, T.; PESCH, M.; WIEDMAIER, M.; BRANDNER, M.: *Laserintegrierte Komplettbearbeitung – erste Anwendung in der Praxis*. In: DAUSINGER, F. et al. (Hrsg.): Proc. of the 6th Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Stuttgart. Wiesbaden: AWT, 1996, S. 779-788.
- [148] BRANDNER, M.; SIGEL, J.: *Laserintegration in Drehzentren – Komplettbearbeitung und Rapid Prototyping*. In: Stuttgarter Impulse: Innovation durch Technik und Organisation / FTK'97. Berlin: Springer, 1997, S. 476-479.
- [149] KRASTEL, K.: *Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen*. Laser in der Materialbearbeitung. Forschungsberichte des IFSW. München: Utz, 2002.
- [150] SCHNEIDER, J.: *Mit Verfahrensintegration die Prozesskette verkürzen*. WB Werkstatt und Betrieb **137** (2004) Nr. 6, S. 82-85.
- [151] EBERL, G.: *Lasercaving – Neue Technologie für den Werkzeug- und Formenbau*. Automatisierung in Fertigung und Montage **28** (1990), S. 82-87.
- [152] EBERL, G.; HILDEBRAND, P.; KUHL, M.; SUTOR, U.; HÜGEL, H.; MEINERS, E.; WIEDMAIER, M.; ZELLER, T.: *Laserspanen eine neue Technologie zum Abtragen*. Laser und Optoelektronik **25** (1993) Nr. 3, S. 80.
- [153] N. N.: *Neues Verfahren in der Lasertechnologie*. Der Stahlformenbauer **19** (2002) Nr. 2, S. 18.
- [154] Internet-Seiten der Firma *Sulzer Metco*, Winterthur (Schweiz): <http://www.sulzermetco.com/eprise/Sulzermetco/Sites/Products/ThermalSprayProducts/ThermalSprayEquipment/overview.html>.
- [155] Internet-Seiten der Firma *Medicoat AG*, Mägenwil (Schweiz): <http://www.medicoat.ch>.
- [156] NUSSBAUM, H.: *Vorrichtung zum dosierten Zuführen von Pulver zu einer Pulververarbeitungsseinheit*. Patentschrift DE 2 80 78 66, 1978.
- [157] NUSSBAUM, H.: *Apparatus for the metered supply of powder to a powder processing unit*. Patentschrift US 4 22 78 35, 1980.
- [158] GRÜNENWALD, B.; HENNIG, W.; DAUSINGER, F.; NOWOTNY, S.: *Waagengeregelter*

- Pulverförderer für das einstufige Laserbeschichten.* Messtechnische Briefe **30** (1994) Nr. 2, S. 37.
- [159] GRÜNENWALD, B.; HENNIG, W.; NOWOTNY, S.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Laser process adapted powder delivery system.* In: MAZUMDER, J.; CONDE, O.; VILLAR, W.; STEEN, W. (Hrsg.): *Laser Processing: Surface Treatment and Film Deposition.* Proc. NATO ASI Series E, Vol. 307. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1996, S. 411-420.
- [160] HEIGL, R.: Persönliche Mitteilung 17.02.2004.
- [161] Produktinformation der Firma *Aisan Industry Co.*, Aichi (Japan): *New ultrasonic motor-incorporated powder feeder.*
- [162] SEXTON, C. L.; STEEN, W. M.; WATKINS, K. G.; VILAR, R.; FERREIRA, M. G. S.: *Triple hopper powder feeder system for variable composition laser cladding.* In: Proc. of the Int. Conf. of Lasers and Electro-Opt. (ICALEO'93), San Diego. Orlando: Laser Insitute of America, 1993, S. 824-834.
- [163] LI, L.; STEEN, W. M.: *Sensing, modelling and closed loop control of powder feeder for laser surface modification.* In: Proc. of the Int. Conf. of Lasers and Electro-Opt. (ICALEO'93), San Diego. Orlando: Laser Insitute of America, 1993, S. 965-974.
- [164] LI, L.: *Intelligent laser cladding control system design and construction.* PhD thesis, Imperial College, London University, Mai 1989.
- [165] LAGAIN, G. L.: *Powder supply device for the formation of coatings by laser beam treatment.* Patentschrift US 5 182 430, 1993.
- [166] Beschichtungskopf YC50. Produktinformation der Firma *Precitec KG*, 2004 (<http://www.precitec.de>).
- [167] MERIAUDEAU, F.; TRUCHETET, F.: *Control and optimization of the laser cladding process using matrix cameras and image processing.* Journal of Laser Applications **8** (1996) Nr. 6, S. 317-324.
- [168] LI, L.; STEEN, W. M.; HIBBERD, R. D.; WEERASINGHE, V. M.: *Real-time expert system for supervisory control of laser cladding.* In: REAM, S.L. (Hrsg.): Proc. of the 6th Int. Congress on Appl. of Lasers and Electro-opt. ICALEO'87, 8.-12. Nov. 1987, San Diego. Orlando: Laser Insitute of America, 1987, S. 9.
- [169] BACKES, G.; GASSER, A.; KREUTZ, E. W.; TROJAN, K.; WISSENBACH, K.: *Prozeßdiagnose beim Beschichten mit CO₂-Laserstrahlung.* In: WAIDELICH, W. (Hrsg.): *Laser in der Technik.* Vorträge des 10. Int. Kongress Laser 91. Berlin: Springer, 1992, S. 249.
- [170] BACKES, G.; KREUTZ, E. W.; WISSENBACH, K.: *Qualitätssicherung durch Regelung – Prozeßregelung beim Beschichten mit CO₂-Laserstrahlung kann die Bearbeitungsqualität sichern.* F&E (1995) Nr. 1, S. 58.
- [171] BACKES, G.; KREUTZ, E. W.; GASSER, A.; STROMEYER, R.; WISSENBACH, K.: *Process monitoring and control during alloying and cladding with CO₂ laser radiation.* In: MORDIKE, B. L. (Hrsg.): Proc. of the Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials, Sept. 22-23, 1998, Hannover (ECLAT'98). Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, 1998, S. 227.
- [172] SCHELLER, D.: *Prozeßüberwachung bei der Laseroberflächenbehandlung durch Reflexions- und Temperaturmessung.* Aachen: Shaker, 1996.
- [173] COLACO, R.; COSTA, L.; GUERRA, R.; VILAR, R.: *A simple correlation between the geometry of laser cladding tracks and the process parameters.* In: MAZUMDER, J.;

- CONDE, O.; VILLAR, W.; STEEN, W. (Hrsg.): *Laser Processing : Surface Treatment and Film Deposition*. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1994, S. 421 (NATO ASI Series E, Bd. 307).
- [174] MÜLLER, M.: *Messung des Einkopplungsgrades beim einstufigen Laserbeschichten*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1995 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 95-06).
- [175] Produktinformation der Firma *TLS W. Reichle*, Lenningen.
- [176] Produktinformation der Firma *Vautid-Verschleißtechnik GmbH*, 1992.
- [177] GASSER, A.: *Oberflächenbehandlung metallischer Werkstoffe mit CO₂-Laserstrahlung in der flüssigen Phase*. Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1993.
- [178] RÖDERS, J.; SHELLABEAR, M.; SIGEL, J.: *Direktes Rapid Prototyping metallischer Bauteile*. In: DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.; OPOWER, H.: Tagungsband der Stuttgarter Lasertage, 28.-29. Sept. 1999, Stuttgart (SLT'99). Stuttgart: Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH, 1999.
- [179] SIGEL, J.: *Modulares Fertigungssystem – objektorientierte Programmierung mit Turbo Pascal 7.0*. Universität Stuttgart, Bericht, 1999 (Institut für Strahlwerkzeuge, IFSW 99-24).
- [180] KAINKA, B.: *PC-Schnittstellen angewandt: Messen, Steuern und Regeln über die Standard-Ports*. Aachen: Elektor, 1993.
- [181] ELSING, J.; WIENCEK, A.: *Schnittstellen-Handbuch*. Vaterstetten: IWT, 1987.
- [182] WIECH, O.: *Laserstrahlbeschichten mit örtlicher Änderung der Beschichtungsgeometrie*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1997 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 97-10).
- [183] SIGEL, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Optic device for generating metallic parts with the LAPS-J-process*. In: AHLERS, R.-J.; REINHART, G. (Hrsg.): *Rapid Prototyping and Flexible Manufacturing*. SPIE Vol. 3102 (1997), S. 86-94.
- [184] HEUGEL, M.: *Neukonstruktion eines Varioobjektivs für das LAPS-J-Rapid-Prototyping*. Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1995 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 95-45).
- [185] KERN, M.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Querjetkonzept mit minimierter Sogwirkung und optimiertem Spritzerschutz*. In: DAUSINGER, F. et al. (Hrsg.): *Proc. of the 6th Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials (ECLAT)*, Stuttgart. Wiesbaden: AWT, 1996, S. 227-234.
- [186] FODE, P.: *Steuerbare Höhenverstellung zur Integration einer LAPS-J Vario-Optik in ein Drehzentrum*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1997 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 97-29).
- [187] Datenblatt FocusMonitor. Produktinformation der Firma *PRIMES GmbH* Pfungstadt, 2003 (http://www.primes.de/download/FocusMonitor_de.pdf).
- [188] BARTH, M.: *Konstruktion einer Pulverdüsenhalterung für das LAPS-J-Rapid-Prototyping*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1996 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 96-07).
- [189] Siemens AG (Hrsg.): *Si-Foto-Dtettoren und IR-Luminiszenzdioden Data Book 1994/95*. Produktinformation der Firma *Siemens AG*, München, 1994.
- [190] BLOEHS, W.: *Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen*. Laser in der Materialbearbeitung. Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: Teubner, 1997.
- [191] GRÜNENWALD, B.; SHEN, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Laser cladding with composite powders using pyrometric temperature control and beam combining*. In: *Proc. of*

- the 26th International Symposium on Automotive Technologies and Automation (ISATA). Aachen: 1993, S. 287.
- [192] LI, L.; STEEN, W. M.; HIBBERD, R. D.; BROOKFIELD, D. J.: *In-process clad quality monitoring using optical method*. In: LAUDE, L. D. (Hrsg.): *Laser-Assisted Processing II*. SPIE Vol. 1279 (1990), S. 89-100.
- [193] OptiCAD. Produktinformation der Firma *OptiCAD Corporation*, Santa Fe NM (USA), 2004 (<http://www.opticad.com>).
- [194] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*, 12. Aufl. Thun: Deutsch, 1989.
- [195] KLINGLER, T.: *Optimierung der Prozeßparameter des LAPS-J-Verfahrens für das Rapid Prototyping*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1997 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 97-24).
- [196] FEHLEISEN, A.: *Temperaturregelung des Schmelzbades beim LAPS-J-Verfahren mit Festkörperlaser*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1997 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 97-24).
- [197] MENZER, M.: *Einfluß der Proben temperatur beim Laserbeschichten*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 1993 (Institut für Strahlwerkzeuge: IFSW 93-05).
- [198] SAMAL, E.; BECKER, W.: *Grundriß der praktischen Regelungstechnik*. 18. Auflage. München: Oldenbourg, 1993.
- [199] MAZUMDER, J.; CHEN, M. M.; CHAN, C. L.; ZEHR, R.; VOELKEL, D.: *Bath convention in laser melting*. In: Bergmann, H. W.; Kupfer, R. (Hrsg.): *Proc. of the 3rd Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials (ECLAT'90)*, Erlangen, 1990. Coburg: Sprechsaal Publishing Group, 1990, S. 37-53.
- [200] HE, X.; MORDIKE, B. L.; PIRCH, N.; KREUTZ, E. W.: *Model for calculation of concentration distribution in laser alloyed pool*. In: *Proc. of the 5th Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials (ECLAT'94)*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1994, S. 260-265.
- [201] SIGEL, J.; STEINBACH, A.: *Meßverfahren und -systeme zur berührungslosen Abstandsmessung und deren Bewertung hinsichtlich On-line-Messungen beim Laserbeschichten*. Universität Stuttgart, Bericht, 1998 (Institut für Strahlwerkzeuge, IFSW 98-25).
- [202] HÄUSLER, G.: *Verfahren und Vorrichtung zur Abstandsmessung mit inkohärenter Strahlung*. Patentschrift P 42 02 06 499.6-52, 1992.
- [203] KUHL, M.: *Verfahren zum Abtragen mittels Laserstrahl*. Patentschrift: DE 42 00 656 C1 (1993).
- [204] EBERL, G.; KUHL, M.; SUTOR, U.: *Abtragen mittels Laserstrahlung - Prozeßanalyse und Regelungskonzepte*. In: WAIDELICH, W. (Hrsg.): *Laser in der Technik*. Vorträge des 10. Int. Kongresses Laser 91. Berlin: Springer, 1992, S. 272-278.
- [205] SIGEL, J.: *LCTec-Tiefensensor zum Abtragen und Beschichten*. Universität Stuttgart, Bericht, 1999 (Institut für Strahlwerkzeuge, IFSW 99-29).
- [206] SPELLENBERG, B.: *Optische Meßtechnik mit räumlich inkohärentem Licht*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2001.
- [207] N. N.: *LASERCAV depth control system 2.0 users guide*. Pfronten: LCTec GmbH, 1998.
- [208] SIGEL, J.; HENNIG, W.: *Rapid Prototyping metallischer Bauteile durch Laserintegration*. Stuttgart: Institut für Strahlwerkzeuge, Lehrfilm, 1999/2000.

Danksagung

Die Arbeiten zur vorliegenden Dissertation habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs 374 „Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping“ durchgeführt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel danke ich vor allen anderen und ganz besonders herzlich. Er hat in mir die Leidenschaft für die Lasertechnik geweckt, mich an seinem Institut aufgenommen und mich stets voller Vertrauen gefördert und unterstützt. Besonders dankbar bin ich dafür, dass ich mir auch nach meinem Ausscheiden aus dem Institut seiner Unterstützung und Fürsorge als Doktorvater sicher sein durfte.

Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr. rer.nat. habil. Friedrich Dausinger für die Aufnahme in seiner Abteilung, das entgegengebrachte Vertrauen und die gute Zusammenarbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts und die interessanten Anregungen.

Maßgeblich am Gelingen dieser Arbeit waren Frau Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Gabriele Seibold und die Herren Dr.-Ing. Michael Brandner, Dr.-Ing. Matthias Haag und Dipl.-Phys. Jens Walter als ehemaligen Kollegen und guten Freunde beteiligt. Ohne die unzähligen fruchtbaren und anregenden Gespräche hätte ich diese Arbeit sicherlich nicht abgeschlossen.

Mein herzlicher Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Instituts für die gute Arbeitsatmosphäre und die durchgängige Unterstützung. Stellvertretend seien an dieser Stelle die Herren Werner Hennig und Manfred Frank genannt, die mich an ihrem reichen Erfahrungsschatz teilhaben ließen und die damit wesentlich zum Gelingen beigetragen haben.

Großer Dank geht auch an all jene, die mich im Rahmen ihrer Studien- oder Diplomarbeit sowie als wissenschaftliche Hilfskräfte am IFSW unterstützt haben. Namentlich sind dies Frau Dipl.-Ing. Agnes Ott sowie die Herren Dipl.-Ing. Martin Barth, Dipl.-Ing. Stefan Berger, Dipl.-Ing. Holger Eich, Christian Ewert, Dipl.-Ing. Andreas Fehleisen, Dipl.-Ing. Peter Fode, Dipl.-Ing. Gunnar Grubbe, Dipl.-Ing. Martin Heugel, Dipl.-Ing. Tilo Klingler, Dipl.-Ing. Andreas Steinbach und Dipl.-Ing. Jörg Stromann.

Zu guter Letzt, dafür um so herzlicher danke ich meinen Eltern, die mir die Möglichkeit zum Studium gaben und die damit den Grundstein für diese Arbeit gelegt haben sowie meiner geliebten Frau Ulrike, die für mich ein Umfeld voller Rückhalt, Kraft und Motivation zu schaffen wusste und mir unermüdlich mit Rat und Tat zur Seite stand.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Goritz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströimte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströimten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebisch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspaltung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas
beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung
von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim
Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität
von Hochleistungsdiodelenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur
Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten
beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen
mit Festkörperlasern für den Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf
Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung
verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung
des Weichlötlens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften
von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des
Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle
Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen
durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven
Laserpräzisionsabtragens von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den
Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des
Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten
Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept
in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen
für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD
Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und -führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerding, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen Bestimmung des Reflexionsgrades optischer Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen Werkstoffen mittels repetierender Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim Laserstrahlschweißen durch Simulation und Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzision mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen
von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-
verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-
laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-
dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen
mit der Foksmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

