

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

von Dr.-Ing. Jens Walter
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 Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2007

D 93

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2008

ISBN 978-3-8316-0770-9

Printed in Germany

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

Kurzfassung

Das Lasergenerieren ist ein Prozess bei dem durch Auftragschweißen komplexe dreidimensionale Geometrien aus Metall erzeugt werden. Das Verfahrensprinzip beruht darauf, dass mittels eines Lasers ein Schmelzbad auf dem Werkstück erzeugt wird. Durch die gleichzeitige Zufuhr von pulverförmigem Zusatzmaterial entsteht eine erhabene Schmelzraupe („Spur“). Dieses Verfahren ist insbesondere für die Reparatur von Werkzeugen und Formen interessant, erlaubt es doch ein filigranes Arbeiten bei fast völliger Verzugsfreiheit. Größere Auftragsmengen und geometrische Gebilde lassen sich dabei durch Neben- und Übereinanderlegen der Spuren realisieren.

Aufgrund des Zusammenwirkens vieler physikalischer Mechanismen ist der Prozess sehr komplex und es kommt schnell zu teilweise schwer vorhersehbaren Fehlern. Um dies zu verhindern ist eine sehr genaue Kenntnis des Prozesses und eine entsprechend präzise Prozesssteuerung notwendig. Ideal wäre eine Prozessregelung, die den Prozess stabilisiert und im gesteuerten Betrieb notwendige Korrekturen überflüssig macht.

In dieser Arbeit wird zunächst untersucht, wie Spuren gezielt so aufgebaut werden können, dass sie in Bezug auf Breite, Höhe und Aufmischungsgrad den Erwartungen entsprechen. Diese *Qualitätsgrößen* lassen sich vor allem durch Geschwindigkeit, Laserleistung und Pulvermassenstrom beeinflussen. Aus den grundlegenden Zusammenhängen dieser *Stellgrößen* und der Qualitätsgrößen werden gezielt Regeln für die Prozesssteuerung beim Aufbau einzelner Spuren abgeleitet. Weiterführende Untersuchungen an komplexeren Konturen führen zu ergänzenden Regeln, sodass in der Summe der systematische, gesteuerte Aufbau dreidimensionaler Körper möglich sein sollte.

Um nun die Grundlagen für eine Prozessregelung zu schaffen, werden als weitere Klasse die *Meßgrößen* eingeführt. Dies sind vor allem von Photodioden gelieferte Messwerte, die mit den Qualitätsgrößen korreliert werden und sich für die Online-Bestimmung der Spurbreite und -höhe eignen. Die Meßgrößen können zur Qualitätskontrolle genutzt werden, bilden aber auch zusammen mit den Regeln für die Prozesssteuerung die Grundlage für eine Prozessregelung.

Als Beispiel dafür wird die Regelung der Temperatur über die Laserleistung für das Lasergenerieren optimiert und ein Ansatz für die Regelung der Spurbreite vorgestellt. Die Spurbreite wird dabei über die Anpassung der Geschwindigkeit konstant gehalten. Ein weiterer Ansatz befasst sich mit dem Kreuzen („Überfahren“) bereits generierter Spuren. Hier kommt es zu Überhöhungen, die sich auf den weiteren Prozessverlauf negativ auswirken können. Ein Ansatz für einen Regler, der das Überfahren einer Spur erkennt und darauf mit der Rücknahme der Laserleistung reagiert, wird in diesem Zusammenhang entworfen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
Inhaltsverzeichnis	7
Symbolverzeichnis	11
Extended Abstract	13
1 Einleitung	19
2 Stand der Technik	22
2.1 Der Prozess des Lasergenerierens	22
2.2 Anwendungsgebiete	23
2.3 Verwandte Laserverfahren	24
2.4 Alternative auftragende Verfahren	25
2.5 Steuerung des Prozesses	26
2.6 Regelung und Kontrolle des Prozesses	27
3 Problemfelder beim Lasergenerieren	30
3.1 Temperaturfeld	30
3.1.1 Wärmestau	30
3.1.2 Einfluss der Proben­temperatur	33
3.2 Reproduzierbarkeit und Fehlerfortpflanzung	36
3.3 Welleneffekt	36
3.4 Verhalten bei Spurüberkreuzungen	37
3.5 Nachstellung der z-Position	39
4 Methodischer Ansatz	41
4.1 Ausgangssituation und Problemstellung	41
4.2 Lösungsansatz	41
4.2.1 Physikalisches Modell	41
4.2.2 Heuristisches Modell	43
4.2.3 Besonderheiten beider Modellvorstellungen	44
4.2.3.1 Wissenschaftlichkeit	45
4.2.3.2 Nomenklatur	45
4.3 Einschränkungen	46
5 Qualitätsgrößen	47
5.1 Informationen über die Qualität	47
5.2 Spurgeometrie	48

5.2.1	Beschreibung der kreisförmigen Spuren	49
5.2.2	Verhältnis von Breite und Höhe	52
5.3	Aufmischungsgrad	53
5.4	Pulverwirkungsgrad	54
5.5	Der Qualitätsgrößenvektor Q	57
6	Stellgrößen	58
6.1	Prozessbeeinflussende Größen	58
6.1.1	Laserparameter	59
6.1.2	Pulverparameter	59
6.1.3	Maschinenparameter	60
6.1.4	Der Stellgrößenvektor S	60
6.2	Der Zusammenhang von Stell- und Qualitätsgrößen	60
6.2.1	Physikalischer Zusammenhang und die Variationsgröße C	62
6.2.2	Experimentelle Untersuchung zum Laserumschmelzen	63
6.2.3	Experimentelle Untersuchung zum Beschichten	63
6.2.3.1	Spurhöhe	64
6.2.3.2	Spurbreite	67
6.2.3.3	Tiefe der Spur	69
6.3	Arbeiten innerhalb der Sättigung	71
7	Aufbaustrategien	73
7.1	Flächen und Wände als Grundgeometrien	73
7.2	Vermeidung des Temperaturstaus beim Wandaufbau	73
7.3	Ecken und Spurkreuzungen	75
7.4	Volumenkörper	76
7.5	Füllungen eines komplexen Hohlraumes	76
7.6	Richtungsabhängigkeit beim Lasergenerieren mit Lateraldüse	80
8	Messgrößen	82
8.1	Zeitliche Abfolge einer Messung	83
8.2	Räumliche Anordnung eines Sensors	83
8.2.1	Position	83
8.2.2	Abhängigkeit vom Messwinkel	85
8.3	Mögliche Messverfahren	86
8.3.1	Elektrische/Magnetische Messsysteme	86
8.3.2	Akustische Messverfahren	86
8.3.3	Optische Messverfahren	86
8.4	Triangulation als aktives optisches Messsystem	87
8.4.1	Prinzip	87
8.4.2	Kalibration	87
8.4.3	In-Situ-Messung	88
8.5	Pyrometrie und Photodioden	91
8.5.1	Grundlagen	91
8.5.2	Photodiode, Einfarben- und Zweifarben-Pyrometrie	91
8.5.2.1	Photodiode	91

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	9	
8.5.2.2	Einfarben-Pyrometer	92
8.5.2.3	Zweifarb-Pyrometer	93
8.5.3	Reaktion von Pyrometer und Photodiode auf unterschiedliche Prozessparameter	94
8.5.4	Messung der Spurbhöhe	95
8.5.4.1	Modellvorstellung	95
8.5.4.2	Messung der Spurbhöhe mit dem Temperatursensor	97
8.5.4.3	Messung der Spurbhöhe mit dem Rückreflexsensor	98
8.5.5	Messung der Spurbbreite	100
8.5.5.1	Grundlagen	100
8.5.5.2	Idealisierung der Situation durch einen Kalibrierofen	100
8.5.5.3	Messungen der Spurbbreite mit dem Temperatursensor	102
8.5.6	Untersuchungen mit zwei Pyrometern	103
8.5.7	Messungen auf der Plasma-Wellenlänge	104
8.6	Qualitätskontrolle	106
9	Prozessregelung	107
9.1	Grundlagen der Regelungstechnik	107
9.2	Regelung der Temperatur	110
9.2.1	Aufbau des Temperaturreglers	110
9.2.2	Auswirkung der PID-Regelanteile	112
9.2.3	Auswirkung der Regelung auf die Spuranfänge	116
9.2.4	Das endgültige Regelschema	117
9.2.5	Temperaturregelung über den Plasmasensor	121
9.3	Regelung der Spurbhöhe	121
9.3.1	Vorüberlegung	121
9.3.2	Umsetzung	122
9.4	Detektion überfahrener Spuren	124
10	Zusammenfassung	127
	Literaturverzeichnis	131
	Danksagung	139

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
Lateinische Buchstaben		
a	Absenkung der Spur	m
A	Fläche	m ²
A	Querschnittsfläche der Spur	m ²
b	Spurbreite	m
b_{eff}	effektive Spurbreite bei überlappenden Spuren	m
$b_{Fu\beta}$	Fußbreite bei Spuren mit $h > b/2$	m
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	m/s
$c, c_1..c_n$	Konstante	kontextabhängig
c_p	Wärmekapazität	J/kg-K
\mathcal{C}	Verstärkungsfaktor	
C	Konstante beim Temperaturregler	
C	Variationsgröße	
d_S	Schmelzbaddurchmesser	m
dE/ds	Linienenergie	J/m
dm/ds	Linienmasse	kg/m
D	D-Faktor eines Reglers	
$f(x)$	(allgemein:) Funktion von x	kontextabhängig
h	Plancksches Wirkungsquantum	Js
h	Spurhöhe	m
h_{korr}	korrelierende Höhe	m
i	(allgemein:) Zählvariable	
I	I-Faktor eines Reglers	
I	Intensität	W/m ²
k	Boltzmann-Konstante	J/K
k_p	Verstärkungsfaktor	kontextabhängig
$m, m_1..m_n$	Messgrößen	kontextabhängig
\dot{m}	Pulvermassenstrom	kg/s
\dot{m}_{grenz}	max. Pulvermassenstrom, bevor Sättigungsgebiet erreicht	kg/s
m_T	Verhältnismesswert bei dem Zweifarben-Pyrometer	
$m_h = RR/\sqrt{P_L}$	Messwert für die Höhe	kontextabhängig
M	Messgrößenvektor	
n	(allgemein:) Zählvariable	
n	Nummer eines Zeitschritts	

Symbol	Bedeutung	Einheit
n	Anzahl der Spuren	
P	P-Faktor eines Reglers	
P	Leistung	W
P_L	Laserleistung	W
$q, q_1 \dots q_n$	Qualitätsgröße	kontextabhängig
Q	Qualitätsgrößenvektor	
r	Radius	m
r_L	Radius des Laserbrennflecks	m
RR	Messwert für den Rückreflex	kontextabhängig
$s, s_1 \dots s_n$	Stellgröße	kontextabhängig
S	Stellgrößenvektor	
t	Zeit	s
t	Wurzeltiefe der Spur	m
t_{char}	Charakteristische Zeit	s
T	Temperatur	K
$T = h + t$	Gesamttiefe der Spur	m
U_{stell}	Ausgabespannung für den Stellwert	V
v	Geschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m ³
v_{NC}	Im NC-Programm vorgegebene Geschwindigkeit	m/s
x	(allgemein:) Koordinate	m
y	(allgemein:) Koordinate	m
z	(allgemein:) Koordinate	m

Griechische Buchstaben

α	Verlustfaktor	W/K
β	Aufmischungsgrad	
ΔH	Schmelzenthalpie	J/kg·K
Δt	Zeitschritt	s
ΔT	Temperaturdifferenz	K
Δz	Nachstellung in z-Richtung	m
ε	Absorptionsgrad	
ε_{Pulver}	Pulverwirkungsgrad	
ε_{fix}	fixer Anteil des Pulverwirkungsgrades	
ε_{PL}	von der Laserleistung abhängiger Teil des Pulverwirkungsgrades	
λ	Wellenlänge	m
ν	Regelfrequenz	Hz
ρ	Dichte	kg/m ³
$\xi = b/h$	Formfaktor	

Extended Abstract

Introduction

Many items used in daily life are made by injection moulding or metal forming. Their final contour is determined by a negative image made from steel. These tools or dies have to be very accurate and are often rather complex, using several different parts. Some of the structures are very subtle and nerved by cooling channels. Large tools have edge lengths of several meters and weigh many tons. The cost of such a tool ranges up to a quarter million euro.

Often the geometry of the tool doesn't match the requirements in the course of its lifetime. Either some modifications are wished due to modernisation of the product or the tool has been damaged or worn out. As a result of the high price, commonly the tools are not exchanged only because of slight geometrical aberrances. Instead, it is tried to repair them by adding or removing material. While the removing of material is simply done by milling or grinding it is much more difficult to add material.

One possibility which becomes more and more important by time, is laser generating, also known as laser cladding. Here, a laser is used to generate slim metallic tracks. Underneath the spot of a high power laser a small melt pool is created on the surface of the workpiece. Additionally metallic powder is applied into the melt pool by a nozzle so that a raised track emerges. These metallic tracks can be combined to nearly every geometry, so it is not only interesting for the repair of tools but also for rapid tooling and rapid prototyping. A great advantage of the laser generating process is that it allows to create very fine structures while the distortion of the workpiece is very low.

Laser generating is a very complex process, where laserlight, powder and substrate are interacting fast. Gazing at the laser generating process it is amazing to see how structures are generated seemingly from nothingness, using only the invisible laser beam marked by some sparkling powder particles and the nearly invisible, very fine powder beam.

But when working with laser generating one realizes soon that, albeit the benefits of the process, it is difficult to handle and produces often defects which have not been foreseen. A couple of parameters have to be adjusted to get the process working and to produce reasonable tracks. At this point one wishes that there would be a closed loop control doing the most of the parameter work itself, or at least some rules how to control the process properly.

This thesis evolves partly from this wish. Therefore, investigations were not made in some special aspects of laser generating, it was rather tried to analyze the whole process. The main

topics of this thesis are to find rules for a systematical process control and to give the fundament for a closed loop control. This themes, by the way, are still highly actual albeit the problem was described by Li already in 1988:

„Laser cladding ist currently carried out in both production and research centres with fixed operating parameters set either by trial and error methods or according to accumulated experience. [1]“

Methodical Approach

A first approach to come closer to the goals was to investigate in the physical nature of the process. Many different physical mechanisms are at work e.g. thermal conduction or the interaction of laser light with powder particles. It was tried to understand them and to find via this knowledge correlations between the process parameters and the resulting geometry and quality of the tracks. But after a while it became clear that the most of this efforts tends to sink into the black swamp of coupled differential equations.

More successful was a method following an approach of system theory. Here, the process is regarded as a black box. Some information come into the black box, others leave it. All the investigations concern only this information. The physical laws working inside the black box are not of interest in the first instance, but can be explored indirectly analyzing the correlations of the information. This method is called the ‘heuristic model’ and seems to be suitable for the problem to be solved.

The information dropping in and leaving the black box are divided in three classes: First the *adjusting parameters* which drop in the process. This are the parameters which influence the laser generating process and in consequence the resulting tracks. Second there are the *quality parameters* leaving the process. This are all information about the generated tracks. If measurement equipment is used to analyse the process a third class of information are the *measured parameters*, which represents all the measured values.

Counting all possible informations it becomes clear, that the amount is nearly infinity. To reduce this, it is necessary to give additional limiting rules for all information classes. These are derived from the fact that one goal is a closed loop control and additionally it is postulated that the direction-independence of the process must not be touched.

Quality Parameters

Overriding the metallurgical aspects a closer look to the quality parameters shows that only the geometry of the tracks is of interest. Since the tracks are steady over the whole length it is sufficient to describe the cross section. If the tracks are not too thick, the cross section is circle shaped, mainly determined by the surface tension of the melt pool. So the height h and width b of the track describe the track completely.

A second important value is the dilution what means the amount of molten substrate compared to the amount of molten powder. High dilution indicates that the cladding material is highly alloyed with substrate, often leading to unwished intermetallic phases. Therefore, in most cases the dilution should be only as high as necessary to provide a good bond. A common gauge for the dilution is the ratio of the track area to the area of remelted substrate (root). Since this gauge is rather unhandily, in this thesis the dilution is expressed less accurate by the root depth t .

All other properties of the tracks cannot be changed during the process. They are merely fixed by the start conditions as setup, material, powder nozzle, etc. Therefore, it is not possible to change them by closed loop control and the quality parameters are finally

$$Q = (h, b, t) \quad (1)$$

Adjustment Parameters

The adjustment parameters consist of those process parameters solely, which affect the quality parameters if changed during process (in-situ). Finally, only the laser power P_L , the velocity v and the powder feed rate \dot{m} are of value:

$$S = (P_L, v, \dot{m}) \quad (2)$$

Another important parameter, the size of the laser spot, is not considered, because an alteration in-situ is possible only with special optical devices.

An investigation to find the correlations between adjustment and quality parameters (for single tracks) leads to rules necessary to control the process. Here it is important to distinguish between two different fields of work: If more powder is applied than can be molten by the laser power, the process is saturated. There is not enough laser power to melt also the substrate, so in this field of work there is a high risk of producing cavities and a lack of bond. If there is more laser power available than necessary to melt the applied powder, the process is not saturated. Only this field of work is interesting for technical realisation and all investigations presented in this thesis refer to it.

Speed, powder mass feed rate and laser power are connected via the line energy P_L/v and the line mass \dot{m}/v . Following these equations one sees that speed and laser power as well as speed and powder mass rate have similar impacts on the process. Hence in essence there are only two independent adjustment parameters and at most two of three quality parameters can be controlled. Investigations show that the height of a track is determined by the powder mass rate directly and by the speed indirectly. The laser power gives the energy necessary to melt powder and substrate. The dilution increases with laser power. So increasing the powder mass rate raises the track height, but drops the dilution. The width of the track is controlled mainly

by the laser spot size. If the laser is fibre coupled and the spot is not in the focus the intensity distribution is gaussian. In this case there is a secondary influence of the laser power on the width.

With this knowledge it is possible to generate single tracks systematically. For more complex build-ups this rules are still valid, because they consist of many single tracks. But there are some special rules how to combine single tracks to walls, areas or solids. Important is, for example, to avoid heat accumulation and, if tracks are crossed, the laser has to be switched off to avoid an inflation. Special rules refer also to the filling of cavities and how to use a lateral nozzle avoiding a direction-dependence.

Measured Parameters

To come to a close-loop control, the measured parameters have to be analyzed either. Here, the first difficulty is to find a method of measurement which can be used in-situ despite the un hospitable conditions near the melt pool. The direction-independence must even not be touched, so all sensors measuring in advance or after the process, i.e. in front or behind the laser spot, are dropped out: The sensor looked for has to measure inside the melt pool. Here it is hot, the surrounding area is filled by reflected and direct laser light, powder and melt is flying around, and last not least, the space is limited by the optics and powder nozzle. An evaluation shows that only optical sensors can be used here. Their great advantage is that they look through the laser optics and measure directly in the melt pool. So they are not affected by the un hospitable circumstances around the puddle and direction-independence is provided.

Optical systems using an active emitter cannot be used simply, because the signal is outshined by the strong and irregular emissions of the melt pool. The use of (CCD-)camera systems is possible, but the effort to analyze the data in real-time is very high. So a good and easy sensor system has to be based on photodiodes.

The second problem is to find correlations between the measured and quality parameters. Finally, it was possible to find a relation between the width of the track and the temperature signal at a wavelength of 1600 nm. A combination of the back-reflected and applied laser power gives a gauge for the track height.

Some other trials were made with more unconventional sensors hoping to get this way more information about the process or the quality parameters. This were measurements using two pyrometers and measurements of light emitted by the melt pool at a wavelength of 500 nm. None of this methods led to the information hoped for. Another third trial was to measure with a triangulation sensor in-situ. A 'normal' distance measurement with the triangulation sensor is in-situ not possible because of the high outshining. It was interesting, however, in which way the position-sensitive chips of the sensor react on the radiation of the puddle and whether they give information about the process. In fact, it was possible to detect alterations of the track height in the signal. Unfortunately, this correlation was not quite stable and, therefore, no further investigations with the triangulation sensor were made.

The gauges for the track width and height are good enough to develop a quality control system. Therefore, it would be sufficient to give tolerance fields for the height and depth and to check them continuously. If the measured values exceeded the limits, there is the risk of an improper build-up, and the process has to be stopped.

Closed-Loop Control

More interesting than a quality control are closed-loop controls, which automatically correct deviations. This principle is shown on three examples.

Rather popular in laser surface treatment is the use of a temperature controller to avoid heat accumulation. The temperature is measured by pyrometer. To keep it constant, the measured value is controlled by a PID-controller, which affects the laser power directly. With some adaptations and optimizations such a controller can be used for laser generating also.

Less conventional is a track height controller. Main part is again a PID-controller, but as input signal the gauge for the track height mentioned above is used. The output signal affects via an external input the speed-override on the handling machine. So the powder mass flow is biased indirectly.

If two tracks are crossed the resulting inflation leads often to imperfections. Therefore, for a last approach it was tried to develop a detector for crossed tracks. The inflations can be seen clearly in the measured temperature signal. The controller reacts on the signal and turn off the laser when tracks are crossed.

Although the presented controlling approaches work well in a limited field of application, they are still far away from industrial standards. So finally it can be said, that the construction of closed-loop controls for laser generating is a difficult and tedious challenge. Presumably it will still be a desire for the next future. The problems of closed-loop controllers are worsened by the very good results for the process control: The stable and faultless results of a systematical controlled build-up are in the end the rule for the closed-loop controller.

1 Einleitung

Viele Gegenstände des täglichen Lebens werden durch Spritzgießen, Umformen oder auch Schmieden hergestellt. Hierbei wird die Endkontur direkt durch ein in Stahl gefertigtes Negativbild bestimmt, das Form oder Werkzeug genannt wird. Diese Werkzeuge und Formen sind sehr genau gefertigte, komplexe Gebilde. Häufig sind sie aus mehreren Teilen zusammengesetzt, sehr filigran und von Kühlkanälen durchzogen. Größere Werkzeuge können dabei Kantenlängen von mehreren Metern haben, einige Tonnen wiegen und bis zu einer Viertel Mio. Euro kosten.

In der Praxis kommt es häufig zu Abweichungen von der Sollkontur des Werkzeugs, im positiven Fall durch Änderungswünsche und im negativen durch Verschleiß oder Beschädigung. Aufgrund des hohen Preises ist es nicht üblich, die Formen wegen geringfügiger geometrischer Abweichungen zu ersetzen, sondern sie werden repariert. Um solche Änderungen an vorhandenen Formen vorzunehmen, muss Material auf- oder abgetragen werden. Während der Materialabtrag durch Schleifen oder Fräsen problemlos möglich ist, ist ein Materialauftrag deutlich schwieriger.

Eine Möglichkeit, die zur Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist das Lasergenerieren oder Laserauftragschweißen. Hier werden durch den Einsatz eines Lasers unter Zufuhr von Metallpulver feine Spuren aufgeschweißt. Diese können zu fast beliebigen geometrischen Gebilden zusammengesetzt werden. Das Verfahren zieht seinen besonderen Reiz aus der Möglichkeit, mit sehr feinen Spuren und annähernd verzugsfrei zu arbeiten.

Das Lasergenerieren ist ein äußerst komplexes Verfahren, in dem Laserlicht mit dem pulverförmigen Zusatzmaterial und dem Grundwerkstoff in einem hochdynamischen Prozess wechselwirkt. Schon beim ersten Hinblicken erscheint es erstaunlich, wie mit dem unsichtbaren Laserlicht, in dem nur ab und zu Pulverkörner aufleuchten, und einem kaum sichtbaren, feinen Pulverstrahl scheinbar aus dem Nichts filigrane und komplexe Körper gezaubert werden. Dieses Verfahren sowie das in der Literatur niedergelegte Wissen darüber wird in Kap. 2 dargestellt. Zur Abgrenzung wird auch kurz auf verwandte Verfahren eingegangen.

Bei der Arbeit mit diesem Prozess wird schnell klar, dass hier viele Parameter von Bedeutung sind und der Prozess in Hinblick auf Steuerbarkeit und Stabilität nicht einfach zu handhaben ist, wie in Kap. 3 detailliert dargestellt. Leicht kommt da der Wunsch nach einer ausgefeilten Prozessregelung auf, die die vielen Tücken beim Spuraufbau einfach „wegregelt“, oder zumindest doch nach einigen Vorgaben, was beim Aufbau einer Geometrie zu beachten ist, damit das Ergebnis auch wirklich so aussieht, wie es vorher geplant wurde — und das nicht erst nach dem zehnten Anlauf. Eine Problematik übrigens, die ihre Aktualität nicht verloren hat, auch wenn Li sie schon 1988 beschrieb:

„Laser cladding ist currently carried out in both production and research centres with fixed operating parameters set either by trial and error methods or according to accumulated experience.“ [1]

Die vorliegende Arbeit ist ein Stück weit aus diesem Wunsch heraus entstanden. Daher beschäftigt sie sich nicht nur mit einem Teilaspekt dieses interessanten Prozesses, sondern versucht ihn als eine Gesamtheit zu analysieren. Dabei werden zwei Ziele verfolgt: Zum einen systematische Regeln zur Steuerung des Prozesses zu finden, zum anderen eine Grundlage dafür zu schaffen, den Prozess auch geregelt zu betreiben.

Ein erster Ansatz zur Umsetzung dieser Ziele ging „von innen nach außen“: Es wurde versucht, den Zusammenhang von Prozessparametern und Aussehen der Spur durch das Verständnis der wirkenden physikalischen Mechanismen zu ergründen. Dazu galt es die zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten z.B. von Wärmeleitung und Pulver-Laser-Wechselwirkung zu kombinieren und auszuwerten. Jedoch stellte sich heraus, dass die meisten dieser Bemühungen schnell in einem „Sumpf“ gekoppelter Differentialgleichungen versanken.

Erfolgreicher war die Umkehrung der Methode, eine Vorgehensweise von „außen nach innen“. Dazu wird der Prozess nur noch als „Black-Box“ betrachtet, in die Informationen in Form der eingestellten Prozessparameter hineingehen und in Form der resultierenden Spuren und der anfallenden Messwerte herauskommen. Auf die in der Black-Box wirkende Physik wird nur noch indirekt über die Zusammenhänge dieser Informationen geschlossen. Eine genaue Darstellung dieser Methode, der die vorliegende Arbeit in weiten Teilen folgt, findet sich in Kap. 4.

Bei der Umsetzung dieser Methode gilt es, zunächst die in die Black-Box ein- und ausgehenden Informationen zu quantifizieren. Dazu wird in Kap. 5 analysiert, was an den resultierenden Spuren wichtig ist. Diese Informationen stellen eine wichtige Gruppe ausgehender Informationen dar und werden als *Qualitätsgrößen* bezeichnet. Sie umfassen vor allem geometrische Informationen.

Das Kap. 6 befasst sich mit den eingehenden Informationen, d.h. den Prozessparametern. Diese werden *Stellgrößen* genannt und sind auf diejenigen Größen eingeschränkt, die für Steuerung und Regelung des Prozesses von Bedeutung sind. Untersucht wird nun auch der Zusammenhang der Stellgrößen mit den Qualitätsgrößen und damit die Grundlage für eine systematische Prozesssteuerung zum Generieren einfacher Spuren gelegt. Das folgende Kap. 7 erweitert dies um Regeln, die für den Aufbau komplexer dreidimensionaler Gebilde notwendig sind. Am Ende dieses Kapitels wird noch kurz auf die Probleme eingegangen, die sich bei der Füllung von Hohlräumen ergeben, wie sie bei der Werkzeugreparatur auftreten können.

Um nun den Sprung von der Steuerung zu einer Regelung zu schaffen, ist es notwendig, eine weitere Klasse von Informationen zu betrachten, die der Prozess liefert: die in Kap. 8 behandelten *Messgrößen*. Es werden verschiedene Messverfahren diskutiert und daraufhin analysiert, inwiefern sie relevante Informationen über die Qualitätsgrößen liefern. Aus der Korrelation der Messgrößen mit den Qualitätsgrößen wird zum einen eine Qualitätskontrolle möglich. Werden diese Ergebnisse mit dem Wissen um die Prozesssteuerung kombiniert, so

ergibt sich zum anderen die Grundlage für die Prozessregelung. Im abschließenden Kap. 9 werden drei Ansätze dargestellt, wie die Prozessführung durch den Einsatz von Reglern sinnvoll vereinfacht werden kann.

Während die Ergebnisse zur Prozesssteuerung sich in der weiteren Arbeit mit dem Lasergenerieren immer wieder bewährt haben, befinden sich die Regelansätze noch in einem Entwicklungsstadium. Sie sind nur teilweise stabil und noch bei weitem nicht für industrielle Zwecke tauglich. Dennoch sollten alle Ergebnisse dieser Arbeit dem Anwender wie auch dem Wissenschaftler helfen können, das Lasergenerieren weiterzuentwickeln und es beim Einzug in einen sich öffnenden Markt zu begleiten.