

# **Online-Qualitätssicherung beim Laserstrahlbeschichten und -umschmelzen**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde  
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
Thomas Ohmle  
aus Ulm

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. F. Dausinger  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h.  
Dr. h.c. mult. E. Westkämper

Tag der mündlichen Prüfung: 19.05.2009

Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart

2009



## Kurzfassung der Arbeit

Oberflächenveredelungen in Form von laserbeschichteten und umgeschmolzenen Randschichten werden meist in thermisch und mechanisch stark beanspruchten Bereichen eingesetzt. Da kleinste lokale Beschädigungen der Oberfläche verheerende Auswirkungen auf das gesamte Bauteil haben können ist die Kontrolle der Fertigungsqualität unerlässlich. Für die Überwachung von Qualitätsmerkmalen unterhalb der bearbeiteten Oberfläche wie die Spurtiefe und Spuranhaftung sind Sensoren zur Detektion der Prozessstrahlung besonders geeignet. Ebenso wird die Wirtschaftlichkeit der schnellen Laserbearbeitung durch ein Online-Prozessüberwachungssystem verstärkt, weil so teure manuelle Prüfungen oder aufwendige nachgeschaltete Prüfstationen entfallen.

Da Laseroberflächenveredelungen eine Vielzahl an Qualitätskriterien erfüllen müssen gilt es, die Schmelzbadeigenschaften aber auch verschiedene Prozesseinflussgrößen und Spurdefekte zu überwachen. Dem hohen Überwachungsaufwand wird in dieser Arbeit eine Kombination aus integralen und ortsauflösenden Sensoren entgegen gesetzt. Die Verarbeitung der von einer CMOS-Kamera empfangenen Emissionen zu Signalkurven beruht auf Bildauswertelgorithmen deren Entwicklung Teil dieser Arbeit ist. Dazu werden Bereiche der Wechselwirkungszone erfasst, in ihren Eigenschaften analysiert und zum Teil miteinander kombiniert zu Signalverläufen verarbeitet. Solche kamerabasierende aber auch aus integralen Sensoren direkt ableitbare Signalverläufe werden auf ihre Korrelation zu den Qualitätsgrößen geprüft.

Sowohl für das Laserumschmelzen als auch -beschichten wird ein Model vorgestellt, das Zusammenhänge zwischen den Vorgängen in der Wechselwirkungszone und der Prozessstrahlung ableitet. Davon ausgehend werden Algorithmen zur Überwachung von Bearbeitungsdimensionen wie Spurbreite und Spurhöhe aber auch die Erkennung von qualitätsmindernden Fehlern entwickelt. Die vorliegenden Algorithmen sind dabei großteils in der Lage, industrielle Anforderungen zu erfüllen und Qualitätsmerkmale unabhängig von der Fehlerursache und Parametereinstellung zu erkennen.

Um ein Überwachungssystem zu erhalten, das automatisiert und möglichst störungsfrei arbeitet, müssen Signalfilterungen und Signalkorrekturen abhängig von

der Abtastrate des Sensors und der Prozessdynamik und –stabilität vor der eigentlichen Prozessüberwachung durchgeführt werden. Die vorgestellte Messstrategie berücksichtigt einerseits Fehlerentstehungszeitpunkte und definiert andererseits eine Bewertungsreihenfolge weil vereinzelte Qualitätsmerkmale durch Veränderung der Prozessemissionen aufgrund von Qualitätsfehlern nicht mehr klar interpretierbar sind.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung der Arbeit</b>	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Verzeichnis der Symbole</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1 Motivation .....	17
1.2 Zielsetzung .....	18
1.3 Aufbau der Arbeit.....	19
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>20</b>
2.1 Oberflächenbearbeitung mit Laserstrahlung .....	20
2.1.1 Laserstrahlumschmelzen.....	21
2.1.2 Laserstrahlbeschichten.....	38
2.2 Qualitätssicherung bei der Lasermaterialbearbeitung .....	46
2.2.1 Online-Prozessüberwachung mit integral messenden Sensoren.....	47
2.2.2 Online-Prozessüberwachung mit orts aufgelöst messenden Sensoren .	48
2.2.3 Offline-Systeme zur nachgeschalteten Ergebnisprüfung.....	50
<b>3 Laserstrahlumschmelzen und -beschichten im industriellen Umfeld</b>	<b>51</b>
3.1 Industrielle Anwendungen zum Laserumschmelzen und -beschichten .....	51
3.1.1 Laserstrahlumschmelzen in der Industrie .....	51
3.1.2 Laserstrahlbeschichten in der Industrie .....	52
3.2 Versuchsaufbau und Prozessdurchführung .....	53
3.2.1 Versuchsdurchführung der Umschmelzprozesse.....	53
3.2.2 Versuchsdurchführung der Beschichtungsprozesse.....	56

3.2.3	Sensorik zum Erfassen der Prozessemissionen.....	57
3.3	Fehlerschwerpunkte und Anforderungen an die Qualitätssicherung.....	65
3.3.1	Qualitätsmerkmale beim Laserstrahlumschmelzen .....	66
3.3.2	Qualitätsmerkmale beim Laserstrahlbeschichten.....	70
<b>4</b>	<b>Analyse der Bearbeitungsergebnisse und der Prozesstrahlung</b>	<b>73</b>
4.1	Analyse des Umschmelzvorganges .....	73
4.1.1	Modell zum Laserstrahlumschmelzen .....	74
4.1.2	Bewertung der Umschmelzbreite.....	87
4.1.3	Bewertung der Umschmelztiefe.....	91
4.1.4	Erkennung von Coatingfehlern .....	101
4.1.5	Erkennung von mangelnder Schutzgaszufuhr.....	105
4.1.6	Erkennung von Fehlstellen im Grundmaterial .....	111
4.1.7	Erkennung der falschen Bearbeitungsposition.....	115
4.2	Analyse des Beschichtungsvorganges .....	118
4.2.1	Modell zum Laserstrahlbeschichten.....	118
4.2.2	Bewertung der Beschichtungsbreite.....	133
4.2.3	Bewertung der Beschichtungshöhe.....	136
4.2.4	Bewertung der Aufmischung .....	144
4.2.5	Erkennung von Fehlern in der Spursymmetrie .....	149
4.2.6	Erkennung von mangelnder Schutzgaszufuhr.....	152
4.2.7	Erkennung von Rissen.....	155
<b>5</b>	<b>Prozessüberwachung beim Laserstrahlumschmelzen und –beschichten</b>	<b>160</b>
5.1	Signalverarbeitung und –filterung .....	160
5.1.1	Korrektur von Unregelmäßigkeiten der Bildanalyse .....	161
5.1.2	Filterung der Messkurve .....	164
5.2	Messstrategie zum Laserstrahlumschmelzen.....	166
5.2.1	Datenerfassung.....	167
5.2.2	Prüfung der Startbedingungen (Prüfstufe 1) .....	168
5.2.3	Erkennung von Prozessfehlern (Prüfstufe 2) .....	169
5.2.4	Erkennung von Anlagendefekten (Prüfstufe 2) .....	169
5.2.5	Bewertung des Prozessergebnisses (Prüfstufe 3).....	172

5.3	Messstrategie zum Laserstrahlbeschichten .....	172
5.3.1	Datenerfassung.....	174
5.3.2	Prüfung der Startbedingungen (Prüfstufe 1).....	174
5.3.3	Erkennung von Prozessfehlern (Prüfstufe 2).....	175
5.3.4	Erkennung von Anlagendefekten (Prüfstufe 2).....	175
5.3.5	Bewertung des Prozessergebnisses (Prüfstufe 3).....	176
5.3.6	Risserkennung während und nach dem Prozess (Prüfstufe 4).....	177
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>178</b>
<b>7</b>	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>184</b>



# Verzeichnis der Symbole

## Lateinische Buchstaben

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
a	m <sup>2</sup> /s	Temperaturleitfähigkeit
a	-	Koeffizient 1
A	m <sup>2</sup>	Fläche
A <sub>A</sub>	-	Absorptionsgrad
b	-	Koeffizient 2
B	m	Breite
c	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit c=299792458 m/s
C	F	Kapazität
Co	-	Anpassungsfaktor durch numerische Simulation
c <sub>p</sub>	J/(kgK)	Isobare spezifische Wärmekapazität
C <sub>s</sub>	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers C <sub>s</sub> =5,67
E	J	Energie
F	-	Formfaktor der Sichelfläche
G	-	Grenzwert zur Oxidationserkennung
h	Js	Plancksches Wirkungsquantum h=6,6260755*10 <sup>-34</sup> Js
H	kJ/mol	Enthalpie
I	W/m <sup>2</sup>	Leistungsdichte, Intensität
I	A	Elektrischer Strom
i <sub>λ,s</sub>	W/m <sup>3</sup>	Spektralspezifische Intensität der schwarzen Strahlung
IO	-	In Ordnung, Gut-Prozess oder Gut-Teil
j	-	Imaginäranteil der komplexen Amplitude (Kondensator)
k	J/K	Boltzmannkonstante k=1,380641*10 <sup>-23</sup> J/K
k	W/m <sup>2</sup> K	Wärmedurchgangskoeffizient
L	m	Länge (charakteristische Länge)
m	kg	Masse
m <sub>mol</sub>	mol	Molare Masse

---

$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
n	-	Normalrichtung
NIO	-	Nicht in Ordnung, Schlecht-Prozess oder Ausschuss-Teil
Nu	-	Nußeltzahl
P	W	Laserleistung
P	-	Pulver
Pr	-	Prandtlzahl
Q	J	Wärme
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\dot{q}$	W/m <sup>2</sup>	Wärmestromdichte
$\dot{q}_n$	W/m <sup>2</sup>	Wärmestromdichte in Richtung der Normalen zur Isotherme
r	m	Radius vor Linse
R	-	Reflexionsgrad
R	Ω	Elektrischer Widerstand
Re	-	Reynoldszahl
r <sub>F</sub>	m	Radius der Stahltaile
S	m	Dicke / Schichtdicke
s	m	Strecke
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
T	-	Transmissionsgrad
T	s	Zeitkonstante T=R*C
U	V	Elektrische Spannung
UT	m	Umschmelztiefe
v	m/s	Vorschubgeschwindigkeit
w	m	Strahlradius nach Linse
W	J	Arbeit
x	m	Kartesische Koordinate, 1. Raumrichtung
x	m	Wärmetransportrichtung bei eindimensionaler Wärmeleitung
x <sub>L</sub>	m	Position des Schmelzbadmittelpunktes relativ zum Laserstrahlzentrum in der 1. Raumrichtung
y	m	Kartesische Koordinate, 2. Raumrichtung
z	m	Kartesische Koordinate, 3. Raumrichtung
z <sub>0</sub>	m	Rayleighlänge

$z_F$	m	Abstand Strahltille zur Fokussierlinse
$z_i$	m	Fokusposition der Laserstrahlung

### Griechische Buchstaben

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	Wärmeübergangszahl
$\alpha_A$	m <sup>-1</sup>	Absorptionskoeffizient
$\delta_T$	m	Temperaturgrenzschichtdicke
$\varepsilon$	-	Emissionsgrad
$\eta$	kg/(ms)	Dynamische Viskosität
$\eta_P$	-	Pulvernutzungsgrad
$\Theta_0$	mrad	Fernfelddivergenz
$\lambda$	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Kinematische Viskosität
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$\sigma$	N/m	Oberflächenspannung
$\sigma_m$	N/m	Oberflächenspannung bei $T_m$
$\sigma'$	-	Oberflächenspannungskoeffizient
$\omega$	1/s	Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$

### Indizes

Symbol	Bedeutung
0,1,2,...	Zustand, Zustandspunkt
A	Absorption
a	Ausgang
AB	Absorption in Schmelzbadfläche
AS	Absorption in Sichelfläche
B	Offenes Schmelzbad
B	Beschichtungswerkstoff
C	Coating
E	Strahlung

e	Eingang
F	Fluid
G	Grundwerkstoff
H	Enthalpie
i	Anzahl
K	Konvektion
L	Bezogen auf charakteristische Länge
L	Wärmeleitung
lam	Laminar
m	Schmelze
mol	Auf molare Masse bezogen
n	Normalkomponente des Ortsvektors
n	Zeitpunkt, Zustandspunkt
O	Oxidation
P	Pulver
R	Reflexion
R	Elektrischer Widerstand nach Ohm
S	Sichelfläche
s	Schwarzer Strahler
S	Spot
S	Streuung
SB	gesamtes Schmelzbad
T	Transmission
turb	Turbulent
u	Umgebung
U	Umschmelzen
W	Wand
WWZ	Wechselwirkungszone

## Extended Abstract

Laser beam processing is winning an ever broader area of application due to its flexibility. Included in these are surface treatments such as laser cladding and laser-remelting, which are implemented in thermally- and mechanically-stressed applications. Surfaces can be optimally adapted depending on the the type of surface procedure and the potential to use filler materials with the required properties. In this way, the surfaces of components with simple and inexpensive base materials can be processed thermally to yield mechanical stability, wear resistance, specific tribology or corrosion-resistance. The laser as a local limited energy source with associated flexibility represents thereby an ideal processing tool. Increasing quality requirements and the fact that the smallest incidence of damage on a specific surface may have wasteful effects on the entire component make inspections of the manufacturing quality a necessity.

Amongst available quality assurance systems, currently in use, if monitoring of the laser and equipment is insufficient to ensure the processing quality, then an on-line process diagnostic system offers the most advantages. In addition to requiring less space and lower investment costs than a subsequent dedicated testing station in the line, the on-line process diagnostic system offers the possibility, by evaluation of process emissions directly from the interaction area, to detect additional quality criteria below the component surface. Quality characteristics such as for example the processing depth or adhesions remain hidden for offline light-assisted inspections or other controls. Manual inspections include additional disadvantages of a slower test speed and the risk of a less constant and less objective inspection in relation to an automated on-line process control.

Despite considerable progress in sensor development, there is according to a literature and patent research no control system for laser remelting and -cladding available, which can demonstrate the necessary functionality, measuring accuracy and reliability for an industrial application. In this work a quality assurance system is developed which evaluates processing dimensions and detects quality defects on basis of process emissions. The investigations were carried out with three different CMOS cameras, an integral measuring temperature- and YAG-reflexsensor as well as a spectrometer and

an acceleration sensor. The processing of the signals received by the CMOS camera into signal curves is based on image processing algorithms whose development is part of this doctoral work. In addition ranges of the interaction zone were measured, their characteristics analyzed and converted to signal curves. The camera based signal curves as well as curves which are directly derivable from integral sensors are investigated on the basis of their correlation to the quality features. The investigations show that integral sensors react very well to relative changes within the process sequence. Thus, integral sensors are better qualified to detect anomalies during the process than to estimate absolute values such as processing dimensions. In contrast, camera-sensors are capable of diagnosing not only the intensity but additionally the absolute position of the process emissions. Therefore cameras offer a comprehensive information content, which is reflected in the cognitive diversity of both measuring the absolute dimensions and recognizing short time span fluctuations generated by process disturbances.

A model is presented for both laser remelting and -cladding that deduces connections between the processing in the interaction zone and the process radiation based on highspeed film data in addition to film data being recorded by the process control camera. On this basis, algorithms were developed that monitor the processing dimensions such as track width and trace height and recognize the occurrence of minor process instances that effect component quality. The presented algorithms are largely able to follow industrial requirements and to detect quality features independently of the error cause and parameter setting.

Indicators were developed and qualified to evaluate the processing quality for the laser remelting process. The width of the remelted trace corresponds to the width of an isotherm located in the interaction zone. The depth of the trace can be evaluated by the shift of a crescent-shaped bright area in the interaction zone on the feed motion axis. Different coating types cause changes in the intensity of the emissions and damages in the coating evoke disturbances within the respective areas of the interaction zone. The chemical change of the meltpool surface by an unsatisfactory inert gas atmosphere leads to increased beam absorption and can be measured by the proportional increase in process emissions. Porosity or gas inclusions in the basic material shift the equilibrium between laser energy and material mass, which leads to heating-up of the meltpool. The irregular temperature rises of the meltpool in this region depending on the number and size of blowholes can be clearly differentiated from the normal process. A separate evaluation area in the CMOS image with the principle of a level

indicator recognises deviations in the given processing position on the basis of reference outlines.

On laser cladding the width of a single cladding trace is evaluated in a fashion similar to the laser remelting by the observation of the width of an isotherme in the interaction zone. Changes in the height of the trace cause a shift of the meltpool on the feed axis in the plan view perspective of the monitoring camera. The properties of the fusion are approximated using a ratio relating the cross-section area of the fusion zone to the total cross-section area of the trace. The height and depth of the trace required are independently determined and derived by using empirical constants. The clad symmetry, which essentially depends on the relative placement of powder and nozzle, is controlled by observing the deviation of the laser beam center to the point of powder flow. An insufficient supply of inert gas can induce the formation of pores. Pores themselves cannot be recognized, however a connection between the process emissions and the supplied inert gas quantity ensure that no process conditions appear with reduced inert gas quantity, which may cause the formation of pores. Cracks, which can occur up to a certain time after process end, are detected by monitoring the impact sound waves spreading in the material.

In order to acquire a monitoring system which works automatically and as trouble free as possible, signals must be filtered and corrected depending on the scanning rate, the sensor, the process dynamics and stability of the process before the actual process control be carried out. The presented measuring strategy considers the point in time at which the error arises on the one hand, whilst on the other hand it defines a measuring sequence because few quality criteria are not clearly interpretable when process defects alter the process emissions. In the case of laser remelting, the measurement begins with the process start and ends with process end, because no necessary information before and after the process is required. The first emissions at the process beginning are used to examine whether a workpiece with the correct coating is present, before quality assurance is carried out for the rest. Measurement for laser cladding processes begins before the actual process with a confirmation check of the powder nozzle position by the process control camera. During laser cladding, the information for control of the main quality criteria are collected and the process control ends with the impact sound measurement, which is continued beyond the end of process until the risk no longer exists that cracks can be generated at the cooling. Evaluation is not coupled to the absolute times at which emissions arose in order to allow a direct correlation to the quality, but controls the order in which the quality criteria can be analyzed. In the case of both remelting and cladding the evaluation sequence first

checks errors that decrease the component quality, before validating the dimensions of the processed area. From a production viewpoint, the processing dimensions of a defective component are no longer of interest, as it must be scrapped anyway. From the view of process diagnostic an evaluation of the processing dimensions are no longer feasible if a process error disturbs the emissions of the meltpool in such a way that the different areas of the interaction zone cannot be identified and analysed sufficiently.

A sensor system, consisting of a CMOS camera, an acceleration sensor and a real time evaluation unit with potential to supplement further with an infrared and a YAG-reflex sensor, in combination with a measuring and an evaluation strategy is presented. It was demonstrated within the context of the system engineering and materials in this doctoral work, that this process diagnostic system is suitable for monitoring different quality criteria for the laser remelting and laser cladding processes. Based on this, it is possible to realise a transfer to real components and to pilot the real time prototype to a standard device for series production applications.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Oberfläche eines Bauteils bedarfsorientiert in Art und Umfang zu veredeln stellt ein wirtschaftliches Verfahren zur Bauteiloptimierung dar. Durch die Art des Oberflächenverfahrens und gegebenenfalls des Zusatzwerkstoffes kann die Oberfläche optimal an die an sie gestellte Anforderung angepasst werden. Dazu wird der Grundwerkstoff mit einer funktionellen Oberfläche kombiniert. Der Grundwerkstoff hat oft die Eigenschaften leicht, preiswert und unproblematisch in der Vorbearbeitung zu sein, während die Oberfläche thermisch und mechanisch stabil, verschleißfest, reibungsarm und korrosionsfest ist. Oberflächenverfahren zur Verbesserung der Randschichteigenschaften wie Härten, Umschmelzen, Beschichten und Legieren werden oft nur an definierten, hoch beanspruchten Bereichen eines Bauteils benötigt, wodurch der Laser als lokal begrenzte Energiequelle und seiner damit verbundenen Flexibilität das ideale Werkzeug ist. Die beachtlichen Fortschritte in der Laserentwicklung in Bezug auf Funktionsumfang und Investitionskosten kommen dem in dieser Arbeit untersuchten Laserstrahlumschmelzen und –beschichten nicht nur technisch sondern auch wirtschaftlich entgegen.

Hohe Qualitätsanforderungen an das Bearbeitungsergebnis finden ihre Ursache in den Einsatzfeldern der Oberflächenveredelungen. Zum einen fordern hohe Sicherheitsstandards, wie zum Beispiel in der Luftfahrtindustrie eine einwandfreie Bauteilqualität. Zum andern müssen Bauteile unter extremen Belastungen, wie etwa in Brennräumen von Antriebsaggregaten den Anforderungen in vollstem Maße entsprechen.

Da Laserstrahlquellen bei hohem Automatisierungsgrad und hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten besonders wirtschaftlich arbeiten, ist eine automatisierte Qualitätsprüfung sinnvoll. Vorteil eines automatisierten Qualitätssicherungssystems gegenüber einer manuellen Prüfung ist neben der Prüfgeschwindigkeit die Kontinuität sowie die Objektivität der Bewertung.

Unter den Qualitätssicherungssystemen, die eingesetzt werden, wenn die Überwachung der Strahlquelle, der Bearbeitungsanlage und der Bauteiltoleranz nicht ausreicht um die Bearbeitungsqualität sicher zu stellen, bietet ein Online-Prozessdiagnosesystem die meisten Vorteile. Neben deutlich geringerem Aufwand in Form von Platzbedarf und Investitionskosten gegenüber einer nachgeschalteten Prüfstation bietet das Online-Prozessdiagnosesystem die Möglichkeit, durch die Auswertung von Prozessemissionen direkt aus der Wechselwirkungszone, auch Qualitätsmerkmale unterhalb der Bauteiloberfläche zu erkennen. Solche Qualitätsgrößen wie zum Beispiel die Spurtiefe oder die Spuranhaftung bleiben einer manuellen Prüfung oder einem Offline-Topographieverfahren verborgen.

Trotz eines beachtlichen Entwicklungsfortschrittes in der Sensorentwicklung ist einer Recherche nach kein Prozessüberwachungssystem für das Laserstrahlumschmelzen oder -beschichten bekannt, das die erforderliche Funktionalität, Messschärfe und Zuverlässigkeit für einen industriellen Einsatz nachweisen kann.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit war es, ein Online-Prozessdiagnosesystem zu entwickeln, welches die qualitätsrelevanten Merkmale beim Laserstrahlumschmelzen und -beschichten von Aluminiumwerkstoffen erkennt. Ein solches System kann ausschlaggebend sein für einen geplanten Einsatz vom Laseroberflächenverfahren bei überwachungspflichtigen Spurqualitäten unterhalb der Bauteiloberfläche. Nachgeschaltete Systeme mit einer Aussagefähigkeit zu derartigen Bearbeitungsfehlern wie Ultraschall- oder Wirbelstromprüfungen sind wiederum zeit- und kostenintensiv. Das breite Spektrum an Prozessemissionen aus der Wechselwirkungszone sowie die große Vielfalt an Sensoren ermöglichen und erfordern die Auswahl einer geeigneten Sensorik. Damit erfasste Messdaten stellen die Basis zur Ableitung von Überwachungsstrategien dar, die in ihrer Messschärfe und Zuverlässigkeit getestet und bewertet werden.

Ergebnis dieser Arbeit sollte eine von der Fehlerursache unabhängige Prozessergebnisbewertung von qualitätsrelevanten Merkmalen beim Laserstrahlumschmelzen und -beschichten von Aluminiumwerkstoffen sein, welche das Potential hat, im industriellen Umfeld eingesetzt werden zu können.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Im folgenden Kapitel 2 werden physikalische Zusammenhänge, der Entwicklungsstand sowie Anwendungsgebiete von laserumschmelzenden und -beschichtenden Verfahren dargestellt. Weiterhin wird ein Überblick über den Stand der Technik zur Qualitätssicherung bei Laserbearbeitungen allgemein und speziell beim Laserstrahlumschmelzen und -beschichten gegeben.

Kapitel 3 zeigt industrielle Anwendungen von Umschmelz- und Beschichtungsvorgängen und stellt die in dieser Arbeit eingesetzten Bearbeitungsanlagen und Sensoren vor. Das Kapitel 3 schließt mit der Zusammenstellung und Erläuterung von Fehlerschwerpunkten und den Anforderungen an die Prozessüberwachung.

Im Kapitel 4 wird umfangreich Auskunft über Prozessemissionen und deren Aussagekraft zu bestimmten Merkmalen gegeben. Neben zwei Modellen, die Zusammenhänge zwischen Prozessemissionen und Parameter- bzw. Ergebnisänderungen aufzeigen, werden konkrete Indikatoren zur Erkennung von Qualitätsgrößen vorgestellt.

Die Einzelergebnisse aus Kapitel 4 werden in Kapitel 5 zusammen mit der Signalvorverarbeitung zu umfassenden Mess- und Auswertestrategien für Umschmelz- und Beschichtungsvorgänge bei Aluminiumwerkstoffen zusammengefasst. Bestandteil dieser Strategien sind ebenfalls Ansätze zur Erkennung von Anlagenstörungen mit und ohne Auswirkung auf die Ergebnisqualität sowie die Empfehlung einer Messsensorik.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Laseroberflächenverfahren mit dem Ziel funktionelle Randschichten zu erzeugen werden an Bauteilbereichen und Komponenten eingesetzt, an denen die Eigenschaften des unbehandelten Grundwerkstoffes den auftretenden Belastungen nicht standhalten. Von den verschiedenen Laseroberflächenverfahren wird im ersten Teil dieses Kapitels das Laserstrahlumschmelzen und -beschichten betrachtet. Hierbei werden vorhandene Untersuchungen und physikalische Zusammenhänge beschrieben, welche für die Entwicklung und Auslegung eines Prozessdiagnosesystems wichtig sind. Im nachfolgenden Kapitel 2.2 werden Ansätze für eine aus Sicht der Produktqualität erforderliche Kontrolle der Prozessergebnisse vorgestellt. Um einen tieferen Einblick über Sensoren, Messstrategien und Komplettsysteme zu bekommen wird hier der Horizont über verschiedene Laserverfahren bis hin zum Laserschweißen erweitert. Da das Laserschweißen in der Industrie mittlerweile häufig eingesetzt wird, sind hierfür bereits kommerzielle Systeme verfügbar.

### 2.1 Oberflächenbearbeitung mit Laserstrahlung

Laseroberflächenverfahren werden sowohl mit als auch ohne Zugabe von Zusatzwerkstoffen eingesetzt. Ohne Zusatzwerkstoff wird das Gefüge des Grundwerkstoffes durch die Laserstrahlung homogenisiert. Dabei wird die Strahlung an der Werkstoffoberfläche absorbiert. Die absorbierte Laserstrahlung wirkt wie eine Oberflächenwärmequelle, die je nach Prozessparameter einen Werkstoff härten oder, wenn die absorbierte Energie einen Phasenwechsel bewirkt, umschmelzen kann. Der hohe Temperaturgradient, sowohl beim Aufheizen als auch beim Abkühlen, sorgt für die gewünschte metallurgische Veränderung im Werkstoff.

Deponiert man einen Zusatzwerkstoff vor oder bringt diesen durch eine Pulverdüse in die verflüssigte Wechselwirkungszone ein, wird der Grundwerkstoff mit diesem angereichert oder beschichtet. Beim Anreichern des Grundwerkstoffes wird, abhängig

von der Stoffeigenschaft des Zusatzwerkstoffes und den Prozessbedingungen, dispergiert oder legiert. Bei einer Dispersion mit Hartstoffen wird der Grundwerkstoff verflüssigt. Die Hartstoffe bleiben aufgrund des höheren Schmelzpunktes fest und verteilen sich vor dem Erstarren im flüssigen Grundwerkstoff. Beim Legieren wird der Zusatzwerkstoff ebenfalls verflüssigt und durch Konvektionsströmungen mit dem Grundwerkstoff vermischt. Als Vertreter für Laserverfahren mit oder ohne Zusatzwerkstoff werden in dieser Arbeit das Laserstrahlbeschichten und -umschmelzen ausführlich vorgestellt.

### 2.1.1 Laserstrahlumschmelzen

Beim Umschmelzen wird der zu veredelnde Grundwerkstoff durch den Einfluss photonischer Energiequellen aufgeschmolzen. Die so entstandene Schmelze wird nicht durch einen Zusatzwerkstoff angereichert wodurch eine Einteilung des Laserstrahlumschmelzens nach DIN 8580 in die Hauptgruppe 6 erfolgt (siehe Bild 1).

Form schaffen	Form ändern			Form beibehalten	
<b>Urformen</b> Hauptgruppe 1	<b>Umformen</b> Hauptgruppe 2	<b>Trennen</b> Hauptgruppe 3	<b>Fügen</b> Hauptgruppe 4	<b>Beschichten</b> Hauptgruppe 5	<b>Stoffeigenschaft ändern</b> Hauptgruppe 6
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		Zusammenhalt beibehalten vermindern vermehren

Bild 1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580.

Durch den Phasenwechsel in den flüssigen Aggregatzustand und die Schmelzbadströmung wird ein homogenisiertes, feinkörniges Gefüge erzielt, wie das z.B. bei AlSi10Mg der Fall ist [1]. Verunreinigungen wie z.B. eingeschlossene Oxide im Aluminium werden beseitigt und je nach Erstarrungsgeschwindigkeit werden neue Phasen gebildet. Bei hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten können metastabile Phasen mit einer Übersättigung von chemischen Elementen entstehen [2]. Niedere Erstarrungsgeschwindigkeiten hingegen verfeinern das Gefüge. Bei AlSi10Mg kann

durch Umschmelzen eine Steigerung der Härte um hundert Prozent erreicht werden [1], [3].

Wirtschaftliches Ziel beim Laserstrahlumschmelzen ist es, die vom Laser zur Verfügung gestellte Energie optimal zum Erzeugen eines umgeschmolzenen Volumens zu nutzen. In der Praxis ist der Prozess jedoch durch die in Bild 2 dargestellten Verluste geprägt.

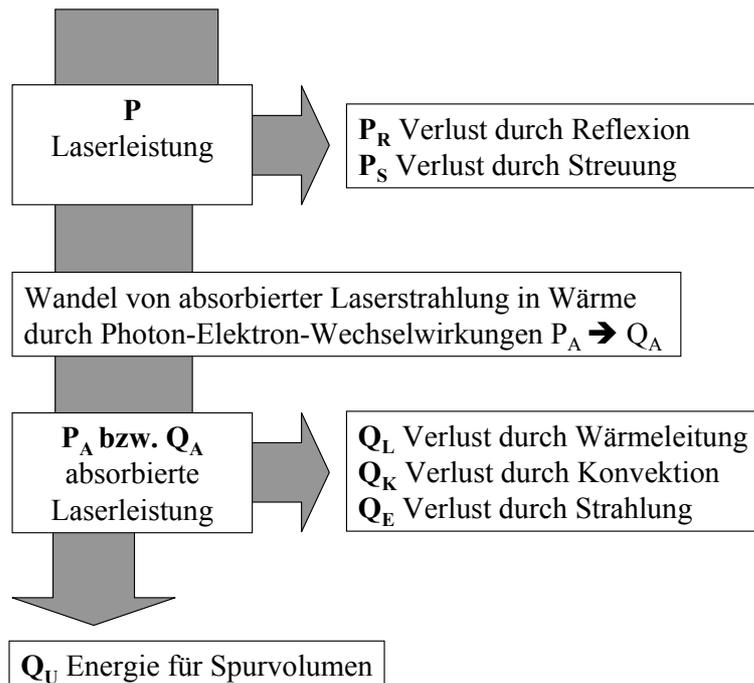


Bild 2: Energiebilanz beim Laserstrahlumschmelzen.

### 2.1.1.1 Absorption und Verluste durch Reflexion

Nach der Energiebilanz aus Bild 2 ist die Absorption der Laserstrahlung ein zentrales Mittel zur Erhöhung der Umschmelzeffizienz und damit zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Auf Absorption, die zur Emission in direktem Zusammenhang steht, wird im Folgenden eingegangen.

Oberhalb des absoluten Nullpunktes strahlt eine schwarze Oberfläche mit der für diese Temperatur charakteristischen Intensität. Diese Strahlungsleistung  $P$  je Flächeneinheit  $A$  lässt sich nach Stefan Boltzmann (Gl. 2.1) berechnen.

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.1)$$

Dabei ist  $\sigma$  die Strahlungskonstante der schwarzen Oberfläche mit einem Wert von

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \quad (2.2)$$

Nach dem VDI-Wärmeatlas [4] ist der Emissionsgrad oder das Emissionsverhältnis  $\varepsilon$  ( $\varepsilon \leq 1$ ) das Verhältnis einer in den Halbraum abgestrahlten Energie einer nicht schwarzen Fläche zum Maximalwert einer schwarzen Fläche bei identischer Temperatur. Ist eine Oberfläche mit der Umgebung im Temperaturgleichgewicht, gilt nach dem Kirchhoffschen Satz, dass der Absorptionsgrad  $A_A$  gleich dem Emissionsgrad  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = A_A$ ) ist. Für eine schwarze Fläche ist  $A_A = 1$ , da alle Strahlung absorbiert wird. Für nicht schwarze Flächen ist  $A_A < 1$ . Beim Auftreffen einer Laserstrahlung auf die Grenzfläche zweier Medien wird ein Anteil reflektiert während ein anderer eindringt. Die Strahlintensität wird beim eindringenden Anteil entlang der Wegstrecke  $s$  exponentiell abgeschwächt.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha_A \cdot s} \quad (2.3)$$

Werkstoffabhängig wird die Intensitätsabschwächung durch den Absorptionskoeffizient  $\alpha_A$  beeinflusst. Der Absorptionskoeffizient liegt nach Hügel [5] für metallische Stoffe zwischen  $10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-1}$ . Der Absorptionsgrad  $A$  und der Reflexionsgrad  $R$  sind die Anteile der gesamten Laserstrahlung, die an der Grenzfläche eindringen bzw. reflektiert werden und nach Gl.2.4 und Gl.2.5 definiert sind.  $P_T$  ist der Anteil der transmittiert wird und im Fall metallischer Werkstoffe gegen Null geht und vernachlässigt werden kann.

$$P = P_A + P_R + P_{T \rightarrow 0} \quad (2.4)$$

$$P = A_A \cdot P + R \cdot P + T \cdot P_{\rightarrow 0} \quad (2.5)$$

Dadurch entsteht eine Verteilung von Absorptionsgrad zu Reflexionsgrad nach

$$A_A = 1 - R \quad (2.6).$$

Der Absorptionsgrad ist von vielen Einflussgrößen abhängig, die von Dausinger in [6] ausführlich beschrieben und im Folgenden nur ansatzweise aufgezeigt werden.

Der Einfluss der Strahlquelle in Bezug auf deren Wellenlänge und Einstrahlwinkel ist in Bild 3 gezeigt. Das in dieser Arbeit umzuschmelzende Aluminium verfügt nach Bild 3a über ein Absorptionsmaximum im Bereich von 900nm. Aus diesem Grund

erscheint der Einsatz von Nd-YAG-Lasern mit einer Wellenlänge von 1064nm und Diodenlasern (808nm und 940nm) im Gegensatz zu einem CO<sub>2</sub>-Laser (10600nm) sinnvoll. Bild 3b zeigt, dass der Einstrahlwinkel ebenfalls Einfluss auf den Absorptionsgrad hat. Das muss bei der Anlagenauslegung und Prozessführung berücksichtigt werden.

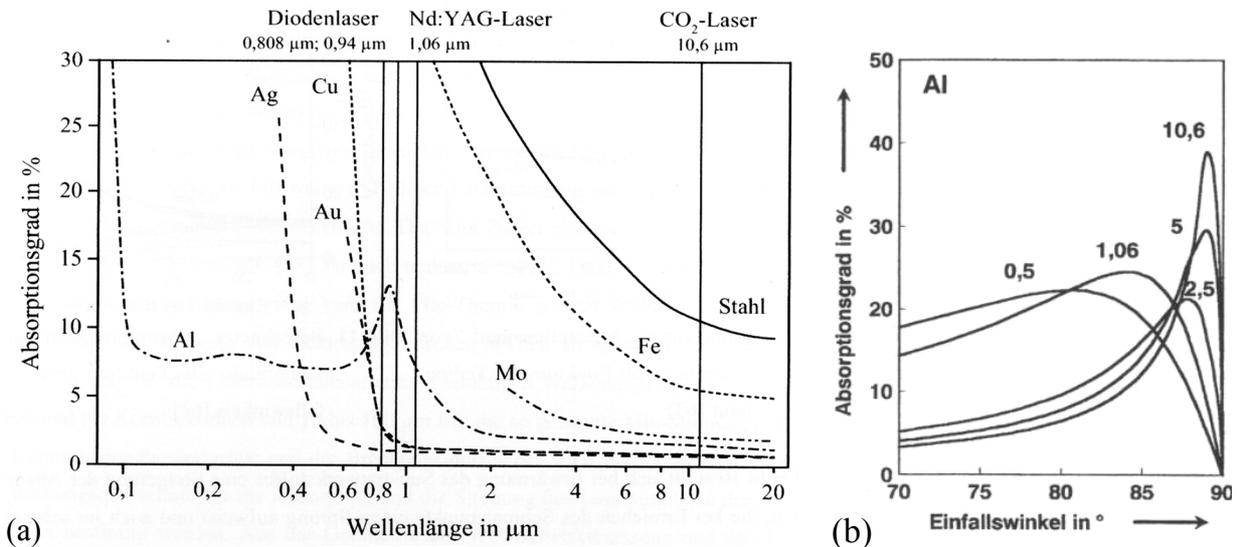


Bild 3: (a) Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Wellenlänge für verschiedene Metalle nach [7]. (b) Abhängigkeit des Absorptionsgrades vom Einstrahlwinkel für Aluminium bei verschiedenen Wellenlängen (in  $\mu\text{m}$ ) nach [6].

In der Literatur sind zahlreiche Untersuchungen zur Bestimmung von Absorptionskoeffizienten für verschiedene Werkstoffe und Oberflächen zu finden. Im Folgenden werden vorwiegend Werte und Zusammenhänge der Materialien dieser Arbeit zusammengefasst. Grundwerkstoff war bei beiden Verfahren, Laserumschmelzen und -beschichten, die Aluminiumlegierung AlSi10Mg. Um die Absorptionsfähigkeit der Aluminiumlegierung beim Laserumschmelzen zu erhöhen wurde eine Coatingschicht aus Graphit eingesetzt. Zusatzwerkstoff beim Laserbeschichten war ein Pulver auf Kupferbasis.

Der Werkstoff an sich, wie auch seine Oberfläche, wirken sich auf den Absorptionsgrad aus. Bild 4 zeigt am Beispiel von Stahl CK 45 den Einfluss der Oberfläche auf die Absorptionsfähigkeit. Je glatter und polierter die Oberfläche ist desto größer ist die Spiegelwirkung der Oberfläche, die den Reflexionsgrad R erhöht. Durch eine steigende Oberflächenrauigkeit oder aufgetragene Schichten kann die Absorption erhöht werden. Besonders geeignet bezüglich des Absorptionsverhaltens

und der Rückstandsfreiheit in der umgeschmolzenen Spur ist eine Schicht auf Graphitbasis. Graphit hat die Eigenschaft, Eisen- und viele Metallschmelzen nicht zu benetzen. Dass die Graphitschicht nicht in die Schmelze gespült wird ist somit wahrscheinlich und wurde durch die Kameraaufnahmen dieser Arbeit belegt. Eine solche Graphitschicht verliert ihre Wirkung mit zunehmender Energiedichte auch unter Schutzgasatmosphäre, dadurch kommt ein Verbrennen nicht als einzige Ursache in Betracht [8]. Durch die zunehmende Veränderung der Graphitschicht mit steigender Bestrahlzeit und Energiedichte und die Temperaturabhängigkeit des Absorptionsgrades kann selbst innerhalb einer Phase (fest oder flüssig) nicht von einem homogenen Absorptionsgrad ausgegangen werden [9].

Ein weiterer signifikanter Anstieg im Absorptionsgrad ist durch die Oxidation des flüssigen Schmelzbades beim Laserstrahlumschmelzen an Luft zu erkennen [6], [10]. Die dabei entstehende, raue, weiße Oxidschicht absorbiert besser als blankes Aluminium. Dadurch kommt es bei Oxidationsreaktionen zu einem positiv rückkoppelnden Effekt [6]. Mit steigender absorbierte Energie erhöht sich die Schmelzbadtemperatur wodurch wiederum stärker oxidiert und absorbiert wird.

Beim Phasenwechsel von fest zu flüssig entsteht bei Aluminium der Sprung im Absorptionsgrad (siehe Bild 4). Dieses Verhalten ist nach [6] nicht nur bei reinem Aluminium sondern auch bei Aluminium-Legierungen erkennbar. Automobilkomponenten aus Aluminium, die ein potentiell Einsatzfeld für Laseroberflächenverfahren stellen, reagieren damit in ähnlicher Weise.

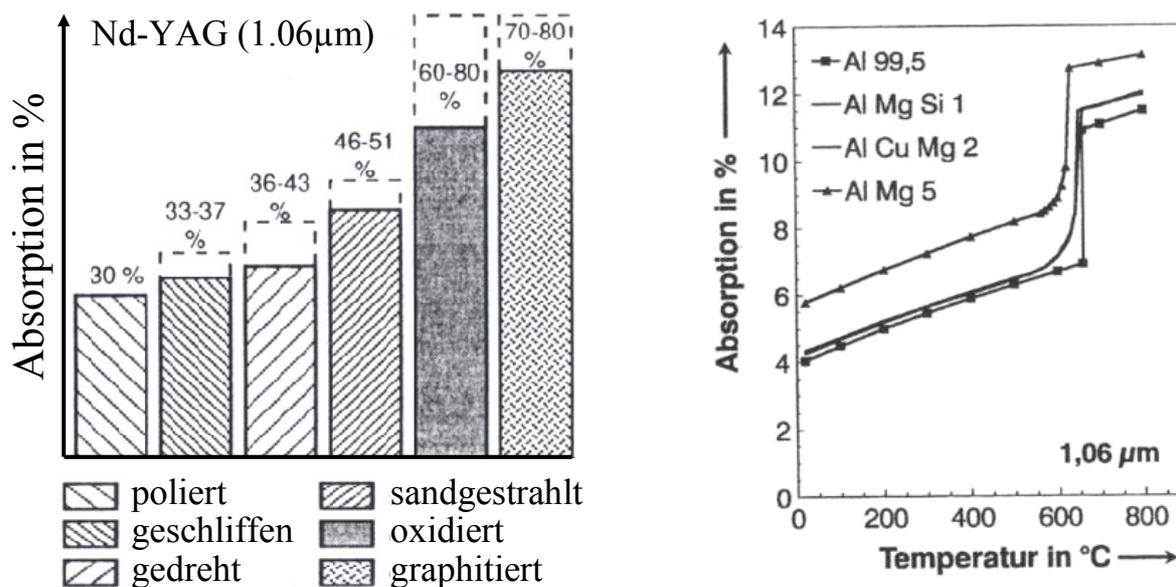


Bild 4: (Links) Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Oberflächenbeschaffenheit für den Stahl CK 45 nach [1]. (Rechts) Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Temperatur für Aluminium nach [6].

Eine Zusammenstellung der Emissions- und Absorptionsfähigkeit aus der Literatur ist unter Berücksichtigung von Temperatur und Oberflächeneigenschaft in Bild 5 gegeben.

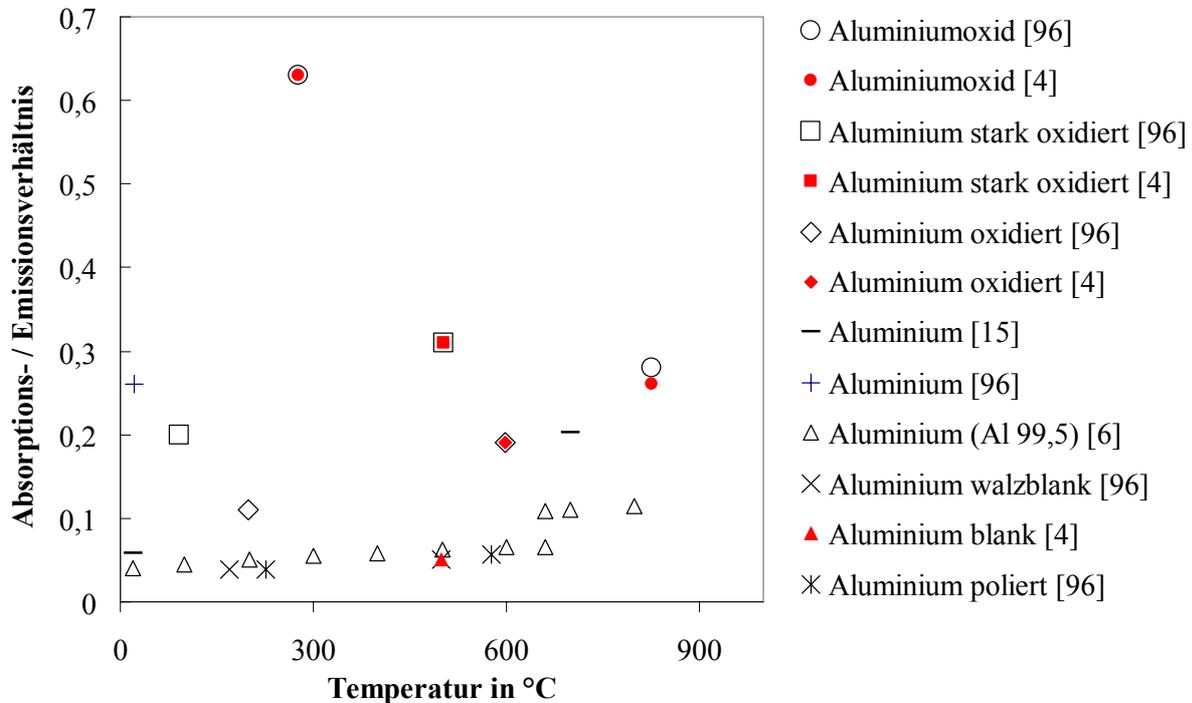


Bild 5: Zusammenstellung der Emissions- und Absorptionsfähigkeit von Aluminium aus der Literatur.

### 2.1.1.2 Wärmeverlust durch Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung

Ist die Laserstrahlung absorbiert, wird sie durch Photon-Elektron-Wechselwirkung in Wärme umgewandelt und liegt damit als Energie im Grundwerkstoff vor. Die Energie in einem abgeschlossenen System kann durch die Zufuhr von Wärme  $Q$  und Arbeit  $W$  geändert werden und ist nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Gl.2.7) definiert.

$$\Delta E = Q + W \quad (2.7)$$

Da es sich um ein photonisches Verfahren handelt wird der Einfluss der Arbeit im Folgenden vernachlässigt. Damit ist die Energiebilanz beim Umschmelzen nach Bild 2 von der eingekoppelten Strahlung und den Wärmeverlusten abhängig.

Der einflussreichste Vertreter der Wärmeverluste ist dabei die **Wärmeleitung**. Liegt in einem Stoff ein Temperaturgradient vor, wird ein Wärmestrom abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Stoffes übertragen. Ist dieser Wärmestrom konstant, somit auch die Temperatur an jedem Ort, entspricht dies einer stationären Wärmeleitung. In diesem Fall kann die Wärmestromdichte nach dem Gesetz von Fourier

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T = -\lambda \cdot \left( \frac{dT}{dx} \cdot \frac{dT}{dy} \cdot \frac{dT}{dz} \right) \quad (2.8)$$

berechnet werden. Der Vektor der Wärmestromdichte ist senkrecht zur isothermen Fläche und entgegengesetzt zum Temperaturgradienten gerichtet, wodurch das Gesetz von Fourier in diesem Fall vereinfacht werden kann zu

$$\dot{q}_n = -\lambda \cdot \frac{dT}{dn} \quad (2.9)$$

$\dot{q}_n$ , die Wärmestromdichte senkrecht zur Isotherme gibt den Wärmestrom an, der pro Flächeneinheit übertragen wird. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$ , der durch die Querschnittsfläche A des Stoffes fließt, also die Wärmemenge, die pro Zeiteinheit übertragen wird, kann durch Gl.2.10 bestimmt werden.

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q}_n \cdot dA \quad (2.10)$$

Unter der Annahme einer eindimensionalen, stationären Wärmeleitung durch einen ebenen Werkstoff gilt für den Wärmestrom

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (2.11)$$

Liegt eine temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes vor und geht man davon aus, dass keine Wärme entweicht, kann Gl.2.11 integriert werden zu

$$\int_{x_1}^{x_2} \dot{Q} \cdot dx = \int_{T_1}^{T_2} -\lambda \cdot A \cdot dT \quad (2.12)$$

bzw.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.13)$$

s ist dabei die Dicke des Werkstoffes in der Richtung des Wärmetransportes.

Die Wärmeübergangszahl  $\alpha$ , also der Wärmestrom der pro Flächeneinheit und pro Grad Temperaturunterschied übertragen wird, ist in Gl.2.14 beschrieben.

$$\alpha = \frac{\lambda}{s} \quad (2.14)$$

Die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium mit 236 W/m·K bei 0°C nach [4] ist überdurchschnittlich hoch. Aus diesem Grund bringt der Umschmelzprozess dieser Arbeit hohe energetische Verluste mit sich, da viel Wärme in den Grundwerkstoff abgeleitet wird.

Der Wärmeverlust durch Ableitung in den Grundwerkstoff wird durch die Wärme ergänzt, die an die gasförmige Umgebung abgegeben wird. Gibt ein Stoff an die umgebende Fluidschicht Wärme ab, erhitzt sich diese und steigt aufgrund der verringerten Dichte auf. Die aufsteigende, warme Fluidmasse zieht umgebende kalte Fluidschichten nach sich an die Phasengrenze zum Werkstoff, wo die neue Fluidschicht ebenfalls erhitzt wird und aufsteigt. Dieser Vorgang, der nur durch die Wärmequelle des Werkstoffes angetrieben wird, heißt freie Konvektion. Wird dagegen die Fluidbewegung durch äußere Kräfte beschleunigt, also eine Fluidströmung über die Werkstoffoberfläche erzeugt, spricht man von **erzwungener Konvektion**. In diesem Fall ist der Wärmeverlust des Werkstoffes, abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsart (laminar oder turbulent) höher als bei freier Konvektion. Umschmelzende und beschichtende Laserverfahren bei Aluminium werden überwiegend unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt. Das Schutzgas strömt über die Wechselwirkungszone wodurch erzwungene Konvektion vorliegt, die im Folgenden näher betrachtet wird. Bei erzwungener Konvektion wird die Wärmestromdichte nach Gl.2.15 berechnet.

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_F - T_W) \quad (2.15)$$

Bei einer turbulenten Strömung ist das Temperaturprofil ähnlich dem Strömungsprofil. Daraus abgeleitet existiert eine Grenzschicht der Dicke  $\delta_T$  zwischen Wand und turbulenter Fluidschicht. Innerhalb dieser wird das Fluid durch Wärmeleitung aufgeheizt, bevor ein Temperatúrausgleich im Fluid durch die Turbulenz der Strömung erfolgt. Die Wärmeleitfähigkeit des Fluids und die Dicke der Grenzschicht sind maßgebend für die Wärmeübergangszahl. Dies verdeutlicht der Zusammenhang

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta_T} \quad (2.16)$$

Da die Grenzschicht im allgemeinen sehr dünn ist und somit nur schwer vermessen werden kann, da der Messfühler die Grenzschicht stören würde, werden Modelle und Kennzahlen zur Abschätzung der Wärmeübergangszahl verwendet. Ein Ziel dieser Modelle ist es, die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  zu ermitteln, um damit sowie mit Hilfe Gl.2.15 die Wärmestromdichte zu berechnen. Die Wärmeübergangszahl kann über die Nußeltzahl bestimmt werden, die von den Stoffeigenschaften, der Geometrie des Körpers, der Richtung des Wärmestroms und der Reynoldszahl abhängig ist. Die Beziehung der Nußeltzahl zur Wärmeübergangszahl und zu den Strömungsbedingungen an einer ebenen Wand ist in der folgenden Gl.2.17 geben.

$$Nu_L = \frac{L}{\delta_T} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2.17)$$

Die charakteristische Länge L ist hier die Länge der Oberfläche, an welcher der Wärmeübergang stattfindet. Da die Nußeltzahl von einer Reihe von Prozessbedingungen abhängt, die einflussreichste jedoch die Strömungsart ist, wird die Nußeltzahl für laminare und turbulente Strömungen unterschiedlich berechnet.

$$Nu_L = f\left(\text{Pr}, \text{Geometrie}, \frac{T}{T_w}, \text{Re}_L\right) \quad (2.18)$$

Nußeltzahl für laminare Strömungen über eine ebene Wand:

$$Nu_{L,lam} = 0,644 \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}} \cdot \sqrt{\text{Re}_L} \quad \text{für } \text{Re}_L < 10^5 \quad (2.19)$$

Nußeltzahl für turbulente Strömungen über eine ebene Wand:

$$Nu_{L,turb} = \frac{0,037 \cdot \text{Re}_L^{0,8} \cdot \text{Pr}}{1 + 2,443 \cdot \text{Re}_L^{-0,1} \cdot (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \cdot f_3 \quad \text{für } 5 \cdot 10^5 < \text{Re}_L < 10^7 \quad (2.20)$$

mit

$$f_3 = \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w}\right)^{0,25} \quad \text{für Flüssigkeiten} \quad (2.21)$$

$$f_3 = 1 \quad \text{für Gase}$$

Nußeltzahl für den Übergangsbereich von laminarer zu turbulenter Strömung über eine ebene Wand:

$$Nu_L = \sqrt{Nu_{L,lam}^2 + Nu_{L,turb}^2} \quad \text{für } 10 < \text{Re}_L < 10^7 \quad (2.22)$$

Zur Beschreibung der Stoffeigenschaften wird die Prandtlzahl als Verhältnis der kinematischen Viskosität zur Temperaturleitfähigkeit nach Gl.2.23 berechnet. Allgemein haben Gase eine Prandtlzahl von ca. 0,7 und Flüssigkeiten von 10.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (2.23)$$

Das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften, die Reynoldszahl, wird nach Gl.2.24 mit der Viskosität des Fluids und der Länge der Übertragungsfläche bestimmt.

$$\text{Re}_L = \frac{c \cdot L}{\nu} = \frac{c \cdot L \cdot \rho}{\eta} = \frac{\dot{m} \cdot L}{A \cdot \eta} \quad (2.24)$$

Mit Kenntnis der Strömungsverhältnisse, der Stoffdaten und der oben beschriebenen Zusammenhänge ist es möglich, die Wärmeübergangszahl und damit die Wärmestromdichte der Verlustwärme durch erzwungene Konvektion zu bestimmen.

**Wärmestrahlung** aus der Wechselwirkungszone ist eine Verlustquelle, die für die Sensorik eine Vielzahl an essenziellen Informationen liefert. Die Temperaturstrahlung ist ein wichtiger Bestandteil der Photonen, die von Sensoren erkannt und zu Messsignalen verarbeitet werden. Die spektralspezifische Intensität für einen schwarzen Körper wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz nach Gl.2.25 beschrieben.

$$i_{\lambda,s} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{C_2/(\lambda \cdot T)} - 1)} \quad (2.25)$$

$C_1$  und  $C_2$  beinhalten ausschließlich physikalische Konstanten und sind wie folgt definiert:

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h = 3,7418 \cdot 10^{-16} \quad [W \cdot m^2] \quad (2.26)$$

$$C_2 = \frac{c \cdot h}{k} = 1,438 \cdot 10^{-2} \quad [K \cdot m] \quad (2.27)$$

Zur Berechnung der emittierten Wärmestromdichte eines schwarzen Strahlers wird die spektralspezifische Intensität nach Planck über alle Wellenlängen integriert.

$$\dot{q} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} i_{\lambda,s} \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot h \cdot c^2} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (2.28)$$

Als Vereinfachung zur Berechnung der Wärmestromdichte kann für einen schwarzen Strahler Gl.2.29 und für einen grauen Strahler Gl.2.30 verwendet werden.

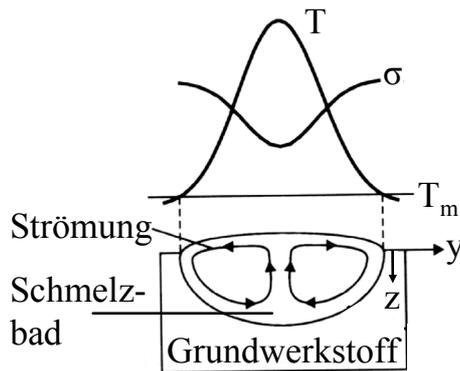
$$\dot{q}_s = C_s \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (2.29)$$

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_s \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (2.30)$$

Die oben vorgestellten physikalischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Bearbeitungszone mit der Umgebung erlauben eine energetische Abschätzung des Umschmelzprozesses, wie in Kapitel 4.1.1.2 durchgeführt.

### 2.1.1.3 Schmelzbadströmung und Schmelzbadeigenschaften

Die Inhomogenität des Absorptionsgrades innerhalb der Wechselwirkungszone und die Intensitätsverteilung des Laserstrahls führen zu einer ungleichmäßigen Oberflächenwärmequelle. Eine ungleichmäßige Oberflächenwärmequelle hinterlässt Temperaturgradienten innerhalb der Wechselwirkungszone, welche Oberflächenspannungsgradienten und damit **Schmelzbadströmungen** induzieren. Die Schmelzbadströmung beeinflusst, durch ihre Richtung und Intensität, maßgeblich die Spurgeometrie. Weil die Spurgeometrie neben qualitätsmindernden Fehlstellen ein Kernkriterium des Umschmelzprozesses ist, wurden in der Vergangenheit zahlreiche Untersuchungen und Simulationen durchgeführt, um Schmelzbadströmungen bei verschiedenen Werkstoffen zu erklären. Grundsätzlich finden Schmelzbadströmungen, vorwiegend Marangoni-Strömungen, ihre Ursache in konzentrations- und temperaturabhängigen Oberflächenspannungen. Auftriebskräfte, bedingt durch temperaturabhängige Dichteunterschiede im flüssigen Schmelzbad spielen nach [10] eine untergeordnete Rolle. Bei reinen Metallen liegt nach [36] ein negativer Oberflächenspannungskoeffizient  $\sigma'$  und eine ortsabhängige Oberflächenspannung nach Gl.2.31 und Gl.2.32 vor. Für eine Strahlquelle mit gaußförmiger Intensitätsverteilung und einen Werkstoff mit negativem Oberflächenspannungskoeffizient liegt die in Bild 6 dargestellte Temperatur- und Oberflächenspannungsverteilung vor.



$$\sigma(T) = \sigma_m + \sigma'(T - T_m) \quad (2.31)$$

$$\sigma' = \frac{d\sigma}{dT} \quad (2.32)$$

Bild 6: Temperatur- und Oberflächenspannungsprofil eines Schmelzbades mit der daraus resultierenden Schmelzbadströmung nach [11].

Die aus den Oberflächenspannungskoeffizienten resultierenden Scherspannungen bewirken eine Oberflächenströmung zum Ort des Spannungsmaximums, welche die in Bild 6 dargestellte Wirbelströmung verursacht. Marangoni-Stömungen, mit üblichen Strömungsgeschwindigkeiten von 1-10m/s [1], beeinflussen abhängig von ihrer Strömungsrichtung die Schmelzbadausbildung, die Topographie der Schmelzbadoberfläche und die Spurform. Auf Werkstoffe mit negativem Oberflächenspannungskoeffizient, zu denen reine Metalle gehören, trifft der linke Zustand aus Bild 7 zu. Die Wirbelströmung verursacht ein breites, flaches Schmelzbad mit einer Überhöhung an den Rändern. Im umgekehrten Fall eines positiven Oberflächenspannungskoeffizienten bildet sich ein schmales, tiefes Schmelzbad (siehe Bild 7 rechts).

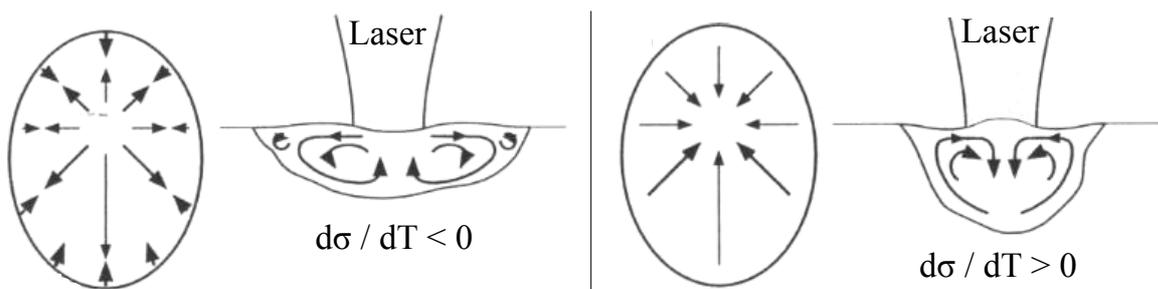


Bild 7: Auswirkung der werkstoffabhängigen Drehrichtung der Schmelzbadströmung auf die Oberflächenkontur und die Schmelzbadausbildung nach [1].

Deformationen der Schmelzbadoberfläche wurden ebenfalls von [12] und [13] erkannt, deren Längsansichten in Bild 8 dargestellt sind und deren Grundlage die

- Wärmeleitungsgleichung (Energiebilanz)

- Navier-Stokes-Gleichung (Impulsgleichung)
- Kontinuitätsgleichung (Massenbilanz) ist.

Bild 8a nach einem Modell von Prich [12] zeigt eine Vertiefung am Schmelzbadmittelpunkt. In diesem Modell wird eine Schmelzbadtemperatur angenommen, die nahe an der Verdampfungstemperatur des Grundwerkstoffes liegt, wodurch der aufkommende Dampfdruck für eine Vertiefung im Schmelzbad sorgt. Der oben beschriebene Einfluss der Marangoni-Strömung wird in diesem Modell der Intensität des Verdampfungsdruckes untergeordnet. Ein weiteres Modell von Zwick [13] zeigt in Bild 8b eine Aufwölbung im Bereich der Wechselwirkungszone. Als Erklärung für die Aufwölbung wird ein Volumensprung beim Phasenwechsel von fest zu flüssig genannt, der werkstoffabhängig bis zu 10% ausmachen kann. In beiden Modellen kommt es durch die Oberflächendeformation zu verschiedenen Absorptionswinkeln, die aber im Fall von Aluminium bei den vorliegenden Deformationen nach [1] keine nennenswerte Auswirkung haben.

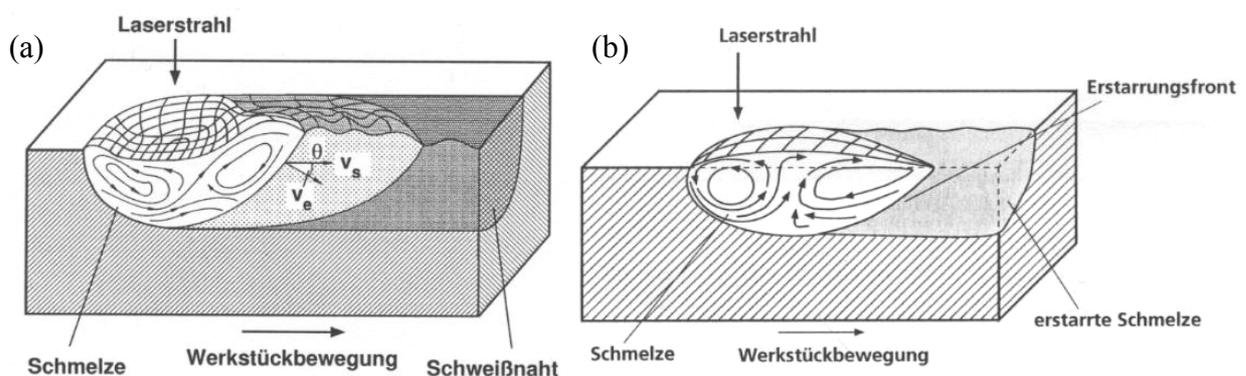


Bild 8: Zwei verschiedene Modelle zur Ausbildung der Schmelzbadströmung beim Laserstrahlumschmelzen. Modell (a) nach [12] und Modell (b) nach [13].

Voraussetzung für die Schmelzbadströmung aus Bild 8 und die von Shen [10] und Haferkamp [14] ermittelten Strömungen aus der Draufsicht ist eine Vorschubbewegung des Lasers oder des Werkstückes. Shen [10] analysierte Hochgeschwindigkeitsfilme während des Umschmelzprozesses eines Stahlwerkstoffes mit Graphitbeschichtung und rekonstruierte die in Bild 9 dargestellte Konvektionsbewegung. Die Graphitschicht wird dabei während des Umschmelzens innerhalb der Wechselwirkungszone durch die Konvektionsbewegung in den Grundwerkstoff gelöst [10], [6]. Haferkamp [14] ermittelte, ebenfalls mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, durch die Verfolgung zuvor auf den Grundwerkstoff aufgeklebter Wolfram Karbide

eine zu Shen ähnliche Schmelzbadströmung. Die Strömungsgeschwindigkeit ist nach Haferkamp grundwerkstoffabhängig, der die Versuche mit verschiedenen Grundwerkstoffen durchgeführt hat. Dabei wurden Wolfram-Karbid-Partikel durch die Schmelzbadströmung an den Schmelzbadrändern entlang nach hinten getrieben.

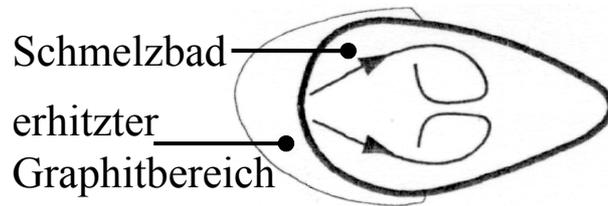


Bild 9: Schmelzbadströmung (Ansicht von oben) nach Shen [10].

Für eine detaillierte Betrachtung allgemeiner **Schmelzbadeneigenschaften**, neben der Schmelzbadströmung und deren Auswirkung auf das Umschmelzergebnis, lassen sich zahlreiche Erkenntnisse aus der Literatur finden, die für die Konzeption eines Prozessdiagnosesystems relevant sein können. In [10] und [11] wird eine Abweichung zwischen der Position des Maximums der Strahlintensität und der Schmelzbadtemperatur dargestellt. Das Maximum der Intensitätsverteilung nach Gauß liegt per Definition im Strahlmittelpunkt und bei einem Top-Hat-Profil verteilt über der Ausdehnung der Maximalintensität. Bedingt durch die Vorschubgeschwindigkeit verlagert sich die höchste Schmelzbadtemperatur, trotz des für die Laserbearbeitung charakteristischen raschen Temperaturanstieges, in Richtung Nachlauf. Wie weit die maximale Temperatur nach hinten versetzt ist, hängt vom Strahlprofil und der Vorschubgeschwindigkeit ab. Bei dem Gaußprofil aus Bild 10a liegt die höchste Schmelzbadtemperatur an der Gleichgewichtsposition zwischen eingebrachter und in den Grundwerkstoff abfließender Wärme. Das Schmelzbad kann nicht mehr weiter erwärmt werden und die Temperatur fällt mit zunehmender Entfernung zum Spotmittelpunkt wegen der gaußförmig fallenden Intensität wieder ab. Am Beispiel des Top-Hat-Profils aus Bild 10b ist der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit erkennbar. Je schneller der Vorschub wird desto weiter verlagert sich das Temperaturmaximum des Schmelzbades nach hinten in den Nachlauf. Der Aufheizprozess benötigt bei gleich bleibender Bestrahlzeit zum Erreichen der Maximaltemperatur mehr Weg. Isothermen im Grundwerkstoff sind ebenfalls vorschubabhängig und in Bild 10b dargestellt.

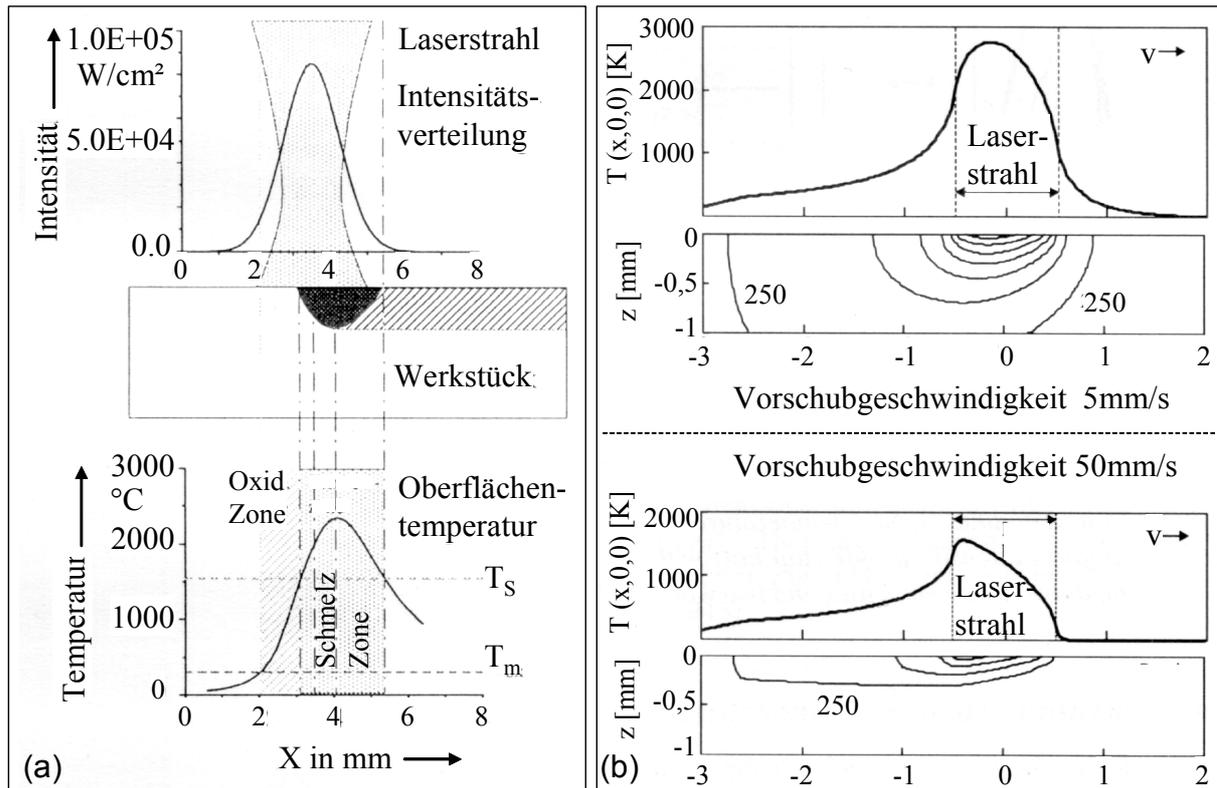


Bild 10: (a) Temperaturprofil beim Laserumschmelzen an der Oberfläche [10] sowie (b) an der Oberfläche und im Grundwerkstoff bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten nach Römer [11].

Bild 10 und zahlreiche andere Autoren dokumentieren einen Zusammenhang zwischen der Laserleistung, der absorbierten Laserleistung, der Schmelzbadausbildung und der umgeschmolzenen Spur. Eine Untersuchung mit konstanter Laserleistung und stehendem Werkstück zeigt einen nicht linearen Zusammenhang zwischen der Bestrahlzeit und der Umschmelztiefe auf (siehe Bild 11a nach [15]). Shen [10] ermittelt ähnliche Zusammenhänge für Prozesse mit zusätzlicher Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Laserspot am Beispiel des Stahls 16MnCrS5 mit einem CO<sub>2</sub>-Laser. Bild 11b zeigt das Ergebnis einer Simulation für variierte Laserleistungen. Auch bei Shen steigt das spezifische Volumen, welches mit der Umschmelztiefe korreliert, nicht linear mit steigender Leistung an. Weiteres Ergebnis der Simulation von [10] ist ein Anstieg der Schmelzbadfläche mit steigender Laserleistung. Dieser Zusammenhang wurde durch Schmelzbadbeobachtungen mit einer CCD-Kamera von Römer [11] bestätigt.

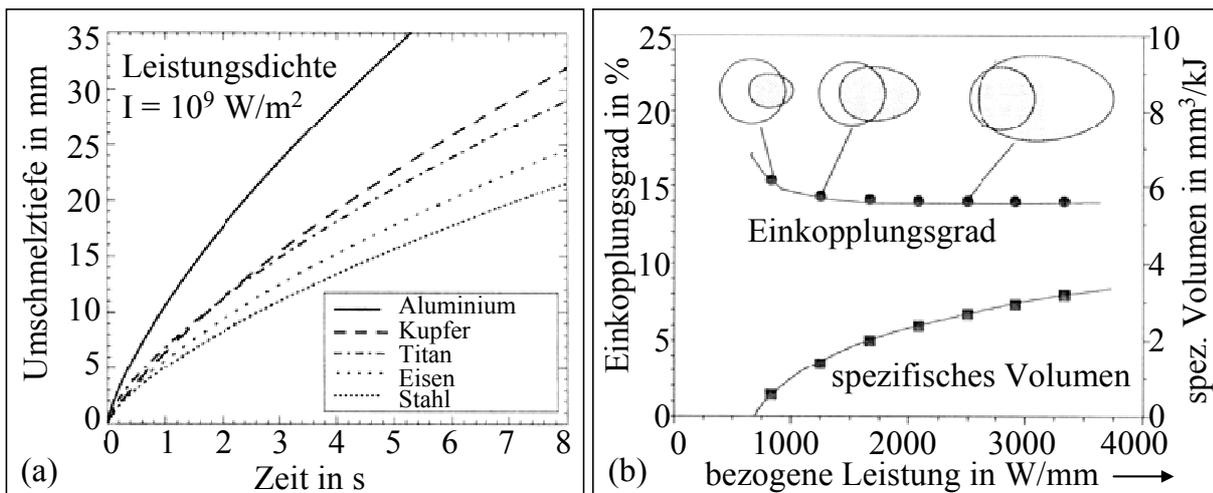


Bild 11: (a) Abhängigkeit der Umschmelztiefe von der Bestrahlzeit nach Xie [15]. (b) Abhängigkeit des Spurvolumens und der Einkopplung von der Leistungsdichte [10].

Als Begründung für den nicht linearen Zusammenhang der steigenden Leistung zum spezifischen Spurvolumen wird in [10] eine sinkende Einkopplung genannt. Von Ohmle [8] wurde dieser Zusammenhang ebenfalls beschrieben und mit CCD- und Thermographiekameraanalysen erklärt. Ohmle hat Aluminiumkörper mit einer Graphitschicht im Rahmen einer umfangreichen Parametervariation umgeschmolzen. Bild 12 zeigt einen auf Vorschub und Strahldurchmesser normierten Energieeintrag in Korrelation zur Umschmelztiefe. Das Diagramm zeigt bei steigendem Energieeintrag eine bis zu einem Maximum ansteigende Umschmelztiefe, die nach Überschreiten des Optimums wieder abfällt. Die obere Ausgleichskurve besteht dabei aus Prozessergebnissen mit großem Strahldurchmesser, der absolut eine höhere Umschmelzbreite und -tiefe erreicht als der kleinere Strahldurchmesser der unteren Ausgleichskurve. Erklärt wird das Maximum der Umschmelztiefe durch einen optimalen Energieeintrag, der so groß ist, dass die Graphitschicht durch die Leistungsdichte gerade nicht zerstört wird. Damit wird die Energie über die gesamte Wechselwirkungszone mit dem hohen Absorptionskoeffizienten des Graphits eingetragen.

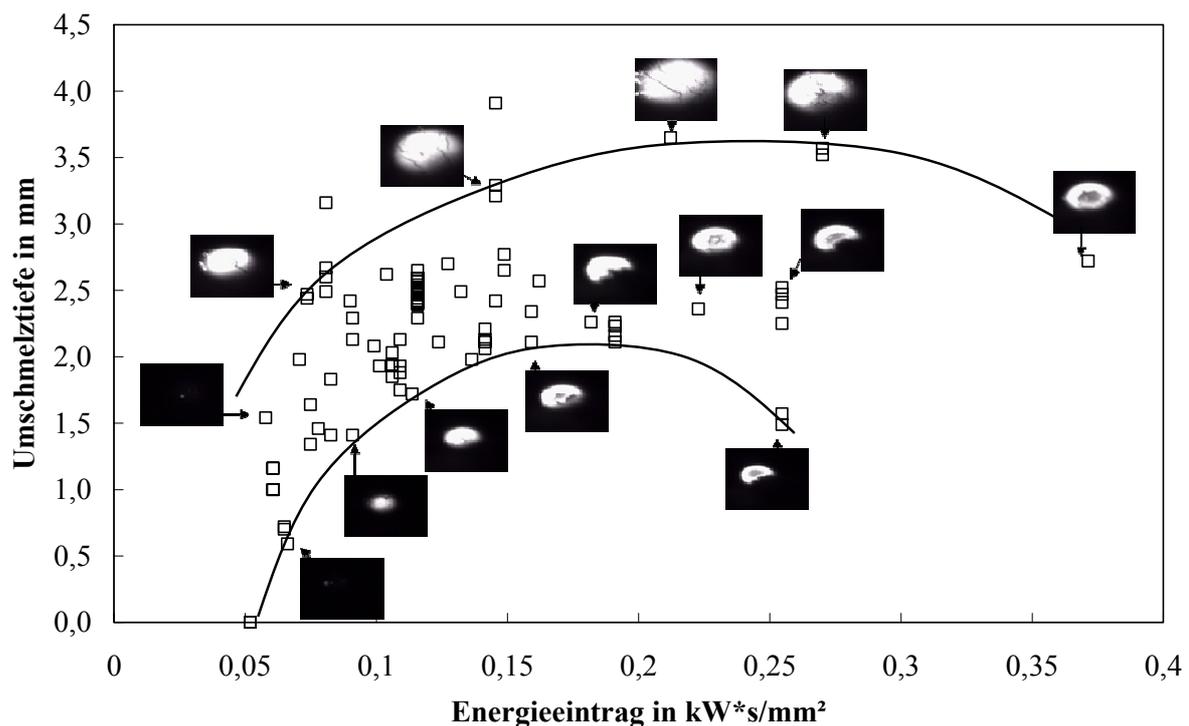


Bild 12: Übersicht über Prozessemissionen, aufgenommen mit einem CCD-Sensor, als Erklärung für den nicht linearen Zusammenhang zwischen verfügbarer Laserenergie und Umschmelztiefe nach [8].

Die in [8] durchgeführten Untersuchungen wurden unter einer Schutzgasatmosphäre durchgeführt, um die Wechselwirkungszone vor unerwünschten chemischen Reaktionen zu schützen. Diese Schutzgasatmosphäre wurde durch eine laminare Umströmung der Wechselwirkungszone mit inertem Argon-Gas erzeugt. Die Schutzgasströmung induziert dabei eine Scherspannung im Schmelzbad und kühlt dasselbe. Scherspannungen und Abkühleffekte sind nach [1] vernachlässigbar, während der ausgeübte Druck des Gasstroms durchaus Einfluss auf das Schmelzbad haben kann.

Eine Tabelle über allgemeine Trends von Prozessgrößen und deren Einfluss auf die Wechselwirkungszone aus der Literatur ist in Tabelle 1 gegeben.

Laser	Prozessparameter	Spurbreite	Spurtiefe	Einkopplung	spezifisches Volumen mm <sup>3</sup> /kJ
CO <sub>2</sub>	Laserleistung bzw. Leistungsdichte steigt		↑[15]	↓[10]	↑[10]
	Vorschub steigt		↓[15]	↓[10]	↓[10]
	Strahldurchmesser steigt			↑[10]	↓[10]
	Bestrahlzeit steigt		↑[15]		
Nd-YAG	Laserleistung bzw. Leistungsdichte steigt	↑[8]*	↑[8]*	↓[10]	↑[10]*
	Vorschub steigt	↓[8]	↓[8]	↑[10]	↑[10]
	Strahldurchmesser steigt	↑[8]	→[8]		

\* bis zur Zerstörschwelle des Coatings

Tabelle 1: Übersicht über die Wechselwirkungen beim Laserumschmelzen zwischen Prozessparameter und Qualitätsgrößen aus der Literatur.

## 2.1.2 Laserstrahlbeschichten

Laserstrahlbeschichten wird nach DIN 8580 (siehe Bild 1) in die 5. Hauptgruppe Beschichten eingeordnet. Nach der Definition ist Beschichten das Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück. Beim Laserstrahlbeschichten soll die haftende Schicht eine schmelzmetallurgische Verbindung mit dem Grundwerkstoff eingehen. Dazu muss der zugeführte Zusatzwerkstoff, das Beschichtungspulver, vollständig aufgeschmolzen und der Grundwerkstoff zumindest angeschmolzen werden. Ziel dabei ist es, eine möglichst reine und fest haftende Schicht zu erzeugen. Eine optimale Ausprägung der aufgeschmolzenen Zone im Grundwerkstoff ist die Voraussetzung dafür. Auf der einen Seite muss ausreichend Grundwerkstoff aufgeschmolzen werden, um eine stabile metallurgische Haftung der Schicht zu gewährleisten. Auf der anderen Seite soll möglichst wenig Grundwerkstoff aufgeschmolzen werden, um die gewünschten Eigenschaften des Beschichtungswerkstoffes nicht durch Mischung mit Bestandteilen aus dem Grundwerkstoff zu verändern.

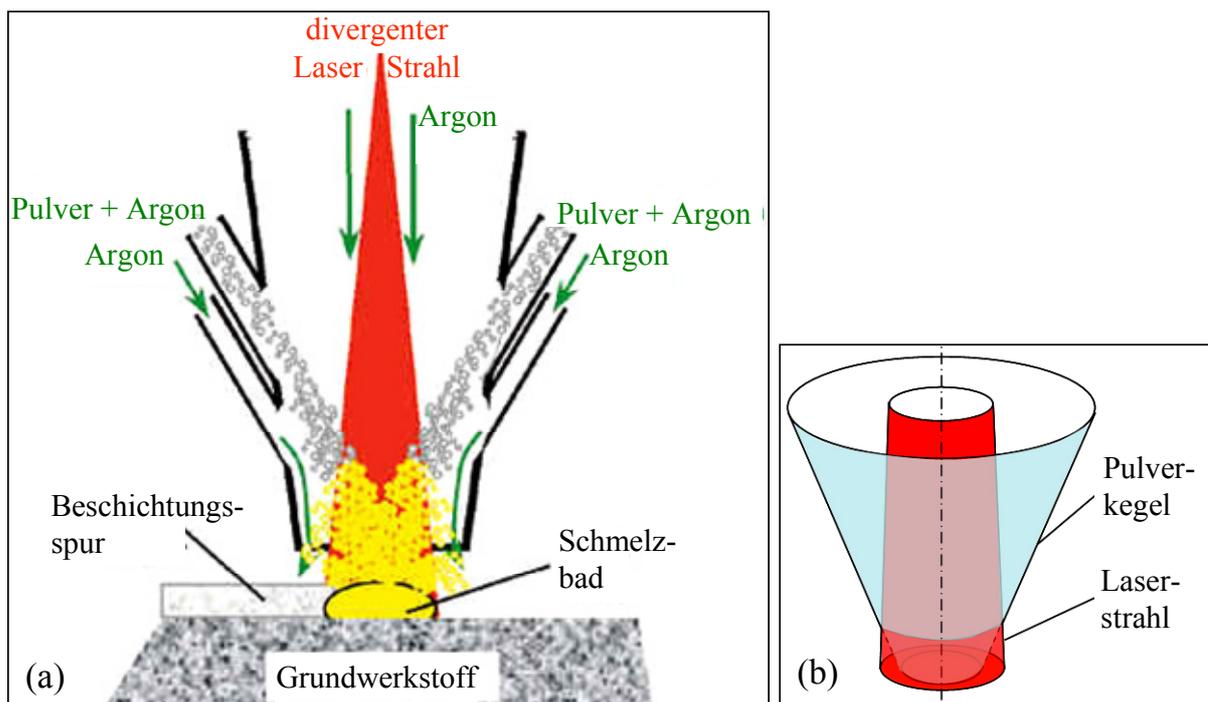


Bild 13: (a) Prinzipbild Laserbeschichten nach [16] und (b) Position der Laserstrahlung zum Pulverstromzentrum.

Das Auftragen solcher funktioneller Oberflächen bewirkt vorwiegend eine erhöhte chemische Beständigkeit, eine erhöhte Härte und Warmfestigkeit sowie verbesserte Verschleiß- und Korrosionseigenschaften. Laserbeschichtungen vereinen gegenüber konventionellen Verfahren die Vorteile einer metallurgischen Verbindung mit einem geringen und lokal begrenzten Wärmeeintrag. Eine metallurgische Verbindung bewirkt im späteren Bauteileinsatz eine hohe Wärmeleitfähigkeit zwischen Grund- und Beschichtungswerkstoff im Gegensatz zur mechanischen Verklammerung. Weiterhin hat die lokale Wechselwirkungszone durch ihren sehr dosierten Wärmeeintrag, im Gegensatz zu thermischen Spritzverfahren, den Vorteil einer minimalen thermischen Belastung. So werden bei temperaturempfindlichen Bauteilen die Konturen in der Nähe von Laserbeschichtungen nicht beschädigt und die metallurgischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes werden so wenig wie möglich verändert.

### 2.1.2.1 Grundlagenuntersuchungen und Prozesseinflussgrößen

Die geringe Masse des Beschichtungswerkstoffes im Gegensatz zu der des Grundwerkstoffes hat zur Folge, dass Erstarrungsvorgänge der aufgetragenen Schicht im

Wesentlichen über Wärmeleitung in den Grundwerkstoff stattfinden. Daraus resultierende Temperatur-Zeit-Verläufe im Werkstück werden durch die Verfahrensparameter und durch die thermophysikalischen Materialeigenschaften festgelegt. Die Erstarrungsmorphologie des Schichtwerkstoffes wird hauptsächlich durch die Erstarrungsgeschwindigkeit und den Temperaturgradienten bestimmt [17]. Ein hoher Temperaturgradient zwischen Beschichtungs- und Grundwerkstoff und eine hohe Abkühlgeschwindigkeit können zu Rissbildung [18] führen die, wie in [19] beschrieben, ein zentrales Qualitätskriterium ist. Zur Reduzierung des Rissrisikos kann der Temperaturgradient durch Vor- und Nachheizen herabgesetzt werden, wie von Grünenwald [20] am Beispiel von Laserbeschichtungen mit CO<sub>2</sub>-Lasern bei niederlegiertem Stahl mit auf Nickel basierendem, pulverförmigem Zusatzwerkstoff dargestellt wird.

In zahlreichen Untersuchungen wurde der Einfluss der eingestellten Anlagenparameter auf die Gefügeausbildung [21], die Spureigenschaft und die Spurdimension untersucht. Im Vergleich dieser Untersuchungen sind einheitliche Tendenzen der Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die Beschichtungsspuren erkennbar aber auch unterschiedliche Auswirkungen bei gleichen Parameteränderungen vorhanden. Ursache dafür sind verschiedene Anlagensysteme z.B. CO<sub>2</sub> oder Nd-YAG Laser, aber vor allem die unterschiedlichen Grund- und Beschichtungswerkstoffe, die wiederum einen direkten Einfluss auf die Schmelzbadausbildung und damit Spurausbildung haben.

Laser	Parameter	Spurbreite	Spurhöhe	Spurtiefe	Spurquerschnitt	spezifisches Volumen	Aufmischung	Energieeinkopplung
CO <sub>2</sub>	Leistungsdichte steigt	↑[22]	→[22]				↑[22]	
	Vorschub steigt	→[22] ↓[23] ↓[10]	↓[22] ↓[23]				↑[22]	
	Pulvermenge / Pulverstreckenmasse steigt	→[22] ↓[33] ↓[23] ↑[10]	↑[22] ↑[33] ↑[23] ↑[10] ↑[24]	↓[33] ↓[23]		↑[33] ↑[10]	↓[22] ↓[33]	↑[23] ↑[10]
	Strahldurchmesser steigt	↑[10]	↓[10]				↓[10]	

Laser	Parameter	Spurbreite	Spurhöhe	Spurtiefe	Spurquerschnitt	spezifisches Volumen	Aufmischung	Energieeinkopplung
Nd-YAG	Leistungsdichte steigt	↑[22]	↓[22] ↓[26] →[25]				↑[22] ↑[26]	
	Vorschub steigt	↓[22] ↓[26] ↓[27]	↑[22] ↓[26] ↓[27]		↓[26]		↓[22]	
	Pulverstreckemasse steigt	↑[22] ↑[26]	↑[22] ↑[26]		↑[26]		↓[22]	
	Schutzgas steigt	↑[22]					↑[22]	
	Strahldurchmesser steigt		→[25]					

Tabelle 2: Übersicht über die Wechselwirkungen beim Laserbeschichten zwischen Prozessparameter und Qualitätsgrößen aus der Literatur.

### 2.1.2.2 Energiebilanz beim Laserbeschichten

Die vom Laser ausgehende Strahlung hat die Aufgabe, zusammen mit dem Beschichtungspulver auf dem Grundwerkstoff ein Schmelzbad auszubilden, das möglichst viel Pulver in eine am Grundwerkstoff anhaftende Spur bindet. Dieses Ziel wird durch Strahl-Stoff-Wechselwirkungen nur unter Verlusten erreicht. Diese Verluste charakterisieren den Wirkungsgrad des Beschichtungsvorganges.

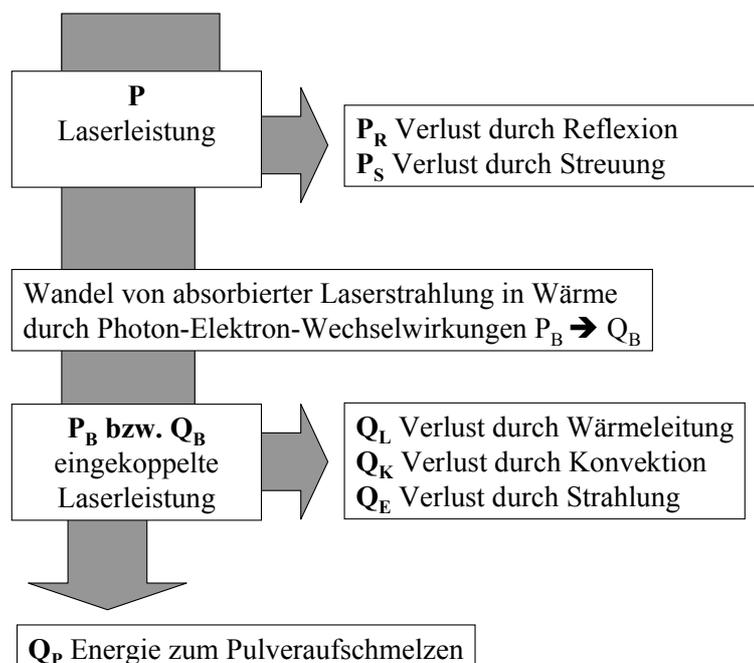


Bild 14: Energiebilanz beim Laserstrahlbeschichten.

Die Laserstrahlung hat nach dem Austritt aus einer koaxialen Pulverdüse einen gemeinsamen Weg zur Grundwerkstoffoberfläche wie die Pulverpartikel bzw. schneidet den Weg von lateral einfliegender Pulver. Bei der Wechselwirkung von Laserstrahlung mit dem Pulver wird die Laserstrahlung vom Pulver gestreut und absorbiert. Die Absorption der Laserstrahlung an den Pulverpartikeln führt zu einer Erwärmung der Partikel und zu einer Beeinflussung der Intensitätsverteilung der Laserstrahlung an der Schmelzbadoberfläche gegenüber der ursprünglichen Intensitätsverteilung (siehe dazu [28] und [29]). Die gestreute Strahlung ist für den Beschichtungsprozess verloren, und wird als Verlust  $P_S$  in Gleichung (2.33) bilanziert. Die vom Pulver absorbierte Energie kann nach [30] bei einer koaxialen Pulverdüse so hoch sein, dass Pulverpartikel noch im Flug den flüssigen Aggregatzustand erreichen. Das Pulveraufheizen ist von der Verweilzeit des Pulvers in der Laserstrahlung, der Absorptionsfähigkeit des Pulvers, der Leistungsdichte und den metallurgischen Eigenschaften des Pulvers (Schmelztemperatur und Schmelzenthalpie) abhängig. Genau diese Faktoren sind nach [31] und [17] dafür verantwortlich, dass ein Erreichen der Schmelztemperatur in den überwiegenden Fällen nicht vorliegt. An der Werkstückoberfläche wird Laserstrahlung zum einen Teil vom Grundwerkstoff, dem Schmelzbad oder von vorhandenen Pulverpartikeln oder Pulvertropfen absorbiert und zum anderen Teil reflektiert. Die reflektierte Leistung ist die Verlustleistung  $P_R$ , während die von Pulverpartikeln, Grundwerkstoff und Schmelzbad absorbierte Laserleistung der eingekoppelten bzw. eingetragenen Laserstrahlung  $P_B$  entspricht

$$P = P_S + P_R + P_B \quad . \quad (2.33)$$

Nach Bild 14 sowie [32] und [33] steht die eingekoppelte Laserleistung  $P_B$ , welche aufgrund von Photonen-Elektronenwechselwirkungen in Form von Wärme vorliegt, nicht ausschließlich als Wärme  $Q_P$  für das Beschichtungsergebnis zur Verfügung, sondern erfährt weitere Verluste. Bestandteile der gesamten Verlustleistung sind Wärmeleitungsverluste  $Q_L$ , die Wärmeabgabe an die umliegende Fluidschicht in Form von Konvektionsverlusten  $Q_K$  und der Verlust durch emittierende Strahlung aus der heißen Wechselwirkungszone  $Q_E$ .

Die Wärme, die durch **Wärmeleitung** in den Grundwerkstoff abfließt, kann analog Gl.2.11 aus Kapitel 2.1.1.2 berechnet werden, außer dass beim Beschichten zusätzlich die Wärmeleitfähigkeit des Beschichtungswerkstoffes mit der entsprechenden Schichtdicke berücksichtigt werden muss. Daraus ergibt sich anstelle der Wärmeleitfähigkeit die Wärmedurchgangszahl nach

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i} = \frac{S_B}{\lambda_B} + \frac{S_G}{\lambda_G} \quad . \quad (2.34)$$

Die Wechselwirkungszone bewirkt durch ihre hohe Temperatur eine freie Konvektionsströmung aus heißer, aufsteigender Luft, die durch die Träger- und Schutzgasströmung der Pulverzufuhr in eine erzwungene **Konvektionsströmung** mit der Verlustleistung  $Q_K$  gewandelt wird. Die Berechnung der Verlustenergie durch Konvektion erfolgt durch die Gleichungen zur Konvektionsberechnung aus Kapitel 2.1.1.2, in dem der Verlustanteil abhängig von der vorliegenden Strömungsart beschrieben ist.

Die Emissionen der Wechselwirkungszone können nach Lin [32] oder über die Gl.2.30 berechnet werden. Der Wärmeverlust in der Wechselwirkungszone durch **Strahlung**  $Q_E$  stellt zusammen mit der Verlustleistung durch Konvektion nach Gassmann [34] einen vernachlässigbaren Anteil von weniger als 1% dar.

$Q_P$  ist die **Pulverenergie**, die zum eigentlichen Auftragen des Pulvers genutzt wird. Pulverpartikel werden nach Verlassen der Pulverdüse im Laserstrahl durch Absorption der Laserstrahlung erwärmt. Beim Auftreffen von Beschichtungspulver auf die Werkstoffoberfläche werden die festen Pulverpartikel, den Benetzungseigenschaften des Schmelzbades nach entsprechend, schnell bis zur Schmelztemperatur aufgeheizt. Nach Erreichen der Schmelzbadtemperatur werden die Pulverpartikel unter Einsatz der Schmelzenthalpie verflüssigt und bis zur Schmelzbadtemperatur erhitzt. Die dafür nötige Zeit ist dabei nach [35] um zwei Größenordnungen kleiner als die mittlere Verweilzeit der Partikel an der Schmelzbadoberfläche. Die zum Aufschmelzen nötige Wärmemenge kann nach Gl.2.35 berechnet werden.

$$Q_P = \eta_P \cdot m_P \cdot [c_{P,P} \cdot (T_B - T_0) + H_P] \quad (2.35)$$

### 2.1.2.3 Schmelzbadeigenschaften und Modellierung

Zu Beginn eines Laserbeschichtungsprozesses bilden sich aus dem eingebrachten Zusatzwerkstoff nach Überschreiten der Schmelztemperatur Tropfen, die auf dem Grundwerkstoff liegen. Die entstehenden Tropfen haben direkt nach dem Verflüssigen eine geringe Temperatur, die mit zunehmender Bestrahlzeit steigt. In der Wechselwirkungszone ist mit zunehmender Verweilzeit ein Agglomerieren zu immer größer werdenden Tropfen aus Zusatzwerkstoff erkennbar. Bild 15 zeigt diesen

Zusammenhang schematisch auf. Bei reinen Metallen ist der Oberflächenspannungskoeffizient negativ, wodurch die Oberflächenspannung mit steigender Temperatur geringer wird [36]. Die Oberflächenspannung nimmt folglich mit zunehmender Temperatur ab, bis die kritische Benetzungstemperatur erreicht ist und sich ein Schmelzbad ausbildet, welches den Grundwerkstoff benetzt und bis zum Anschmelzen erwärmt. Begünstigt wird dieser Vorgang durch Vorwärmeeffekte mittels Wärmeleitung im Grundwerkstoff [18].

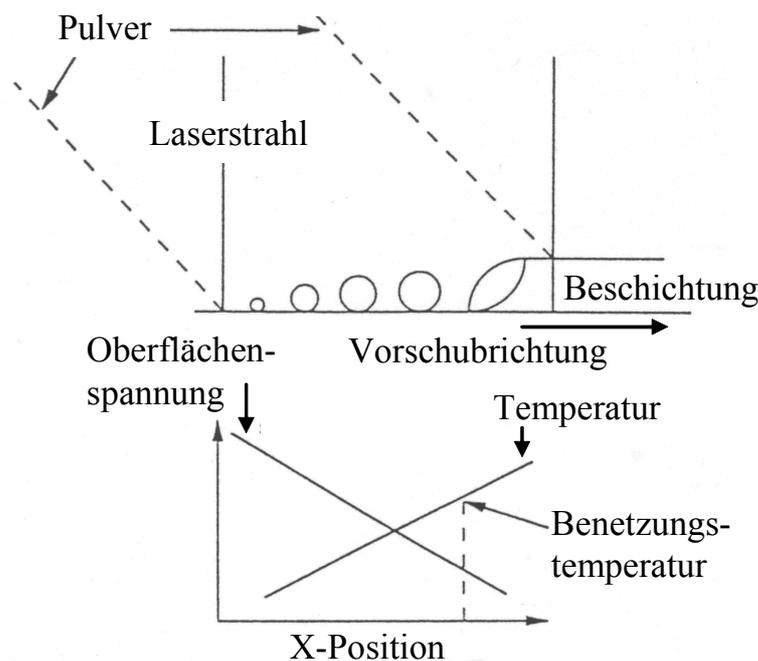


Bild 15: Tropfen- und Schmelzbadbildung in Abhängigkeit von der Materialtemperatur und der Oberflächenspannung nach [92].

Ist ein Schmelzbad vorhanden, wird dessen Ausbildung wiederum durch zahlreiche Einflussgrößen wie Prozessparameter und Materialeigenschaften von Grund- und Zusatzwerkstoff beeinflusst. Ein steigender Pulvermassenstrom durch ein laterales Pulvertransportsystem verschiebt nach Grünenwald [33] das Schmelzbad in Richtung Nachlauf, da mehr Pulver aufgeschmolzen werden muss. Folge ist ein gut absorbierender Teppich aus Pulver im Vorlauf (siehe Bild 16a) gekoppelt mit einer verspäteten Schmelzbadbildung mit hohem Spurvolumen als Prozessergebnis. Die Zunahme der Laserleistung dagegen wirkt sich nach [18] wie in Bild 16b ersichtlich in einer Abnahme der Schmelzbadneigung, Zunahme der Schmelzbadlänge und Zunahme der Schmelzbadtiefe bis in den Grundwerkstoff aus.

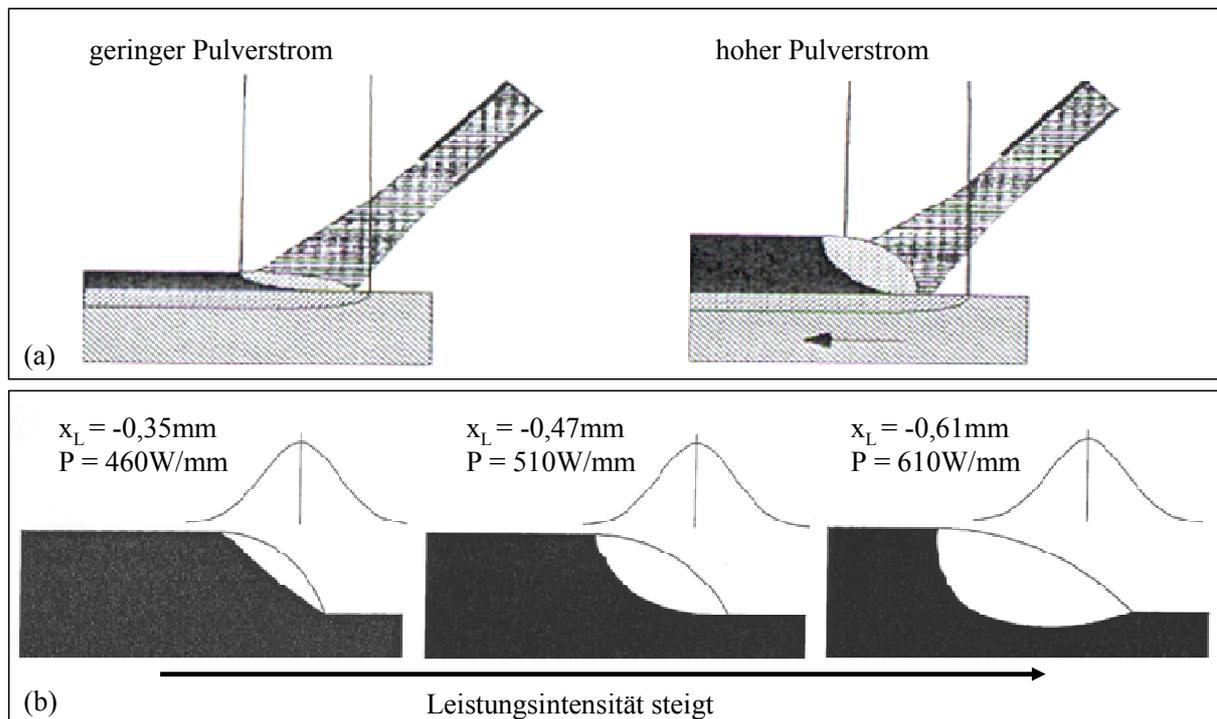


Bild 16: (a) Einfluss der Pulverförderrate auf die Schmelzbadposition und Schmelzbadausbildung nach [33], (b) Einfluss der Laserleistung auf die Schmelzbadposition und Schmelzbadausbildung nach [18].

Eine steigende Leistungsdichte bei konstanter Pulvermasse verursacht eine ansteigende Temperatur im Schmelzbad. Die erhöhte Wärmemenge breitet sich unter anderem durch Wärmeleitung im Schmelzbereich aus wodurch ein größeres und tieferes Schmelzbad mit flacherem Anstieg entsteht. Zusätzlich existieren Schmelzbadströmungen, die für eine Durchmischung von verschiedenen heißen Bereichen im Schmelzbad sorgen. Das inhomogene Aufheizen durch die Laserstrahlung und das partielle Abkühlen des Schmelzbades durch das zugeführte Beschichtungspulver erzeugt temperaturabhängige Oberflächenspannungen. Folge dieser Oberflächenspannungen sind Scherkräfte, die zur Ausbildung von Marangoni-Strömungen führen. Nach Ollier [17], der mit lateraler Pulverzufuhr arbeitete, ist die Temperatur des Schmelzbades in der Mitte am größten. Aus diesem Grund ist die Oberflächenspannung in der Mitte kleiner als an den Randbereichen und folglich der Massentransport von der Schmelzbadmitte zu den Randbereichen. Die Oberflächenströmung weitet sich durch Flüssigkeitsreibung bis in tiefere Schichten aus, was aufgrund der Massenerhaltung zu einer Wirbelbildung führt. Einem numerischen Modell von [17] zufolge, ist beim Beschichten mit lateral zugeführtem Stellite 6 und einem CO<sub>2</sub>-Laser die konvektive Schmelzbadströmung bis zu zwei Größenordnungen höher als die Vorschubgeschwindigkeit.

Zusätzlich zur Marangoni-Strömung bewirken der Aufprall der Pulverpartikel und die Scherkräfte des Schutz- und Trägergasstromes weitere Strömungseinflüsse, die als zusätzliche Komponenten eingehen [17], [18]. Im Fall einer lateralen Pulverzufuhr wird der heiße, flüssige Beschichtungswerkstoff an die Hinterkante des Schmelzbades gedrängt [18].

Durch den Einfluss der Pulver-Gas-Strömung auf die Schmelzbadkonvektion gewinnt die Optimierung der Pulverdüse und der Pulverstromparameter an Bedeutung. Der Einfluss der Pulverstromparameter ist abhängig von der Bauform der Düse und dem untersuchten Prozessfenster. Bei verschiedenen coaxialen Pulverdüsen wird mit steigender Gasströmung der Austrittswinkel des Pulverstromes größer [32], während er bei Meriaudeau [37] bis auf ein Minimum abfällt und erst danach wieder steigt.

Nach dem Passieren der Wechselwirkungszone kühlt die beschichtete Spur bis auf Umgebungstemperatur ab. Die freiwerdende Wärme und die Schmelzenthalpie werden dabei zum Großteil durch Wärmeleitung vom Grundwerkstoff aufgenommen. Diese Erstarrungsvorgänge laufen aufgrund des ungleichen Verhältnisses von Beschichtungswerkstoffmasse zu Grundwerkstoffmasse und dem metallurgischen Verbund sehr schnell ab.

Der Beschichtungswerkstoff als zusätzliche Komponente macht Laserstrahlbeschichten zu einem komplexeren Prozess als das Laserstrahlumschmelzen. Dabei ist nicht nur ein optimaler Pulverstrom einzustellen, sondern dessen Auswirkung auf die Physik der Prozessabläufe mit einer ansteigenden Vielfalt an Wechselwirkungen zu beachten.

## 2.2 Qualitätssicherung bei der Lasermaterialbearbeitung

Zur Überwachung von Laserbearbeitungsprozessen stehen verschiedene Konzepte und Sensoren zur Verfügung. Auswahlkriterien aus dem folgenden Überblick über verschiedene Überwachungsszenarien sind Unterschiede in der Art der Laserbearbeitung, den Qualitätsanforderungen, den Werkstoffen und der Systemtechnik. Die Entwicklung der Sensorik, speziell der Kamera- und Bildverarbeitungstechnik, hat in den vergangenen Jahren beachtliche Fortschritte gemacht. Die einfachste Form der Qualitätsüberwachung, aber auch die mit eingeschränkter Aussagekraft zur Ergebnisqualität, ist die Überwachung der Prozessparameter. Annahme ist hierbei, dass bei

korrekten Prozessparametern wie z.B. Laserleistung, Zusatzwerkstoffmenge oder Vorschubgeschwindigkeit die gewünschte Ergebnisqualität resultiert. Da eine kontinuierliche Überwachung aller vorherrschenden Prozessparameter aufwendig und der Rückschluss auf die Ergebnisqualität risikobehaftet ist, empfiehlt es sich, die Sollwerte der Anlagensteuerung zur Qualitätssicherung zu nutzen und eine unabhängige Sensorik zur Ergebnisbewertung einzusetzen. Diese Ergebnisüberwachung umfasst zwei Hauptgruppen an Systemen, welche grundlegende Unterschiede im Prüfzeitpunkt und damit im Anlagendesign, Zeitaufwand sowie Prüfaufwand mit sich bringen. Online-Systeme, die aus den Emissionen der Wechselwirkungszone während der Bearbeitung Ergebnismerkmale ableiten, bedürfen keiner zusätzlichen Prüfstation oder Prüfzeit. Online-Sensoren müssen jedoch in die Bearbeitungsanlage integriert sein und können damit Störkonturen darstellen. Offline-Systeme bewerten das Bearbeitungsergebnis in nachgeschalteten Prüfstationen mit zusätzlichem Zeit- und Prüfaufwand.

### **2.2.1 Online-Prozessüberwachung mit integral messenden Sensoren**

Integrale Detektoren messen einen integrierten Emissionswert über einen Teil der Wechselwirkungszone oder die gesamte Wechselwirkungszone. Je nach Wellenlängenbereich, in dem die Sensoren empfindlich sind oder durch Filter beeinflusst werden, erhält man Informationen über Temperaturstrahlung (Pyrometer, IR-Sensor), Prozessleuchten (Photodiode), Rückreflexe (Diode, die durch Filter nur bei der Laserwellenlänge empfindlich ist) oder eine wellenlängenabhängige Intensitätsverteilung (Spektrometer).

**Pyrometer und andere infrarotempfindliche Sensoren** sind typische Vertreter von integralen Sensoren, die schon früh Anwendung bei Laserbearbeitungen fanden, um dort die Temperatur z.B. des Schmelzbades zu überwachen. Untersuchungen zur Aussagekraft gemessener Temperaturen aus der Wechselwirkungszone wurden zum Laserstrahlumschmelzen von [11] und [38], die einen Zusammenhang zwischen Laserleistung und Pyrometersignal nachweisen konnten, und zum Laserstrahlbeschichten von [20], [24], [33], [32], [39], [40], [41] durchgeführt. Beim Laserstrahlbeschichten konnten verschiedene Autoren Zusammenhänge zwischen einzelnen Prozess- und Ergebnisgrößen und der integral gemessenen Schmelzbadtemperatur nachweisen, die von [33] und [41] zum Regeln der Laserleistung genutzt wurde.

**Dioden mit Empfindlichkeit im UV- und sichtbaren Wellenlängenbereich** stellen eine hochfrequente und kostengünstige Möglichkeit zur Überwachung von Metaldampf, Prozessplasma und Emissionen sichtbarer Wellenlängen dar. Analog zur Verfügbarkeit von kommerziellen Systemen existieren momentan überwiegend Grundlagenuntersuchungen zur Überwachung von Laserschweißprozessen. Klein [42] und Sun [43] können beispielsweise unter anderem festigkeitsrelevante Merkmale, die im Karosseriebau von Automobilen von entscheidender Bedeutung sind, erkennen. Begründet durch die Anlagenintegration des Sensorsystems werden hier zwei verschiedene kommerzielle Systeme genannt. Der PlasmObserver, beschrieben in [44], führt ein Lichtleitkabel (LLK) zum Abgreifen der Prozessemissionen an die Bearbeitungsoptik. Der in [45] beschriebene WeldWatcher G2 koppelt die Prozessemissionen, welche durch die Bearbeitungsfaser zurückgeführt werden, im Laseraggregat aus. Beide Systeme zeichnen sich durch eine minimale bzw. nicht vorhandene Störkontur an der Bearbeitungsoptik aus.

Eine Spezialform der integralen Emissionsauswertungen stellt die Auswertung der **reflektierten Laserstrahlung** dar. Hierfür werden vor geeignete Sensoren Bandpassfilter platziert, welche die Wellenlänge des Bearbeitungslasers und einen minimalen umgebenden Bereich passieren lassen. Die Eignung der reflektierten Laserstrahlung zur Überwachung des Schweißprozesses ist in [46] beschrieben.

Rissbildung im Grund- oder Zusatzwerkstoff bzw. im Übergangsbereich kann durch die Analyse **akustischer Emissionen** überwacht werden [43], [47]. Da die Luftschallanalyse in einer Produktionsumgebung von erheblichen Störgeräuschen beeinflusst wird, liegt der Schwerpunkt auf der Analyse von Körperschallwellen. Die Schwierigkeit beim Einsatz im Produktionsbetrieb liegt hier im notwendigen Kontakt zwischen Körperschallsensor und Werkstück.

### 2.2.2 Online-Prozessüberwachung mit orts aufgelöst messenden Sensoren

In der Vergangenheit wurden hauptsächlich integrale Sensoren eingesetzt, die Dioden. Ein heute beobachtbarer Trend geht zu den orts aufgelösten Sensoren, den Kameras. Eine ungebremste Kameraentwicklung lässt Grenzen hinsichtlich Bildwiederholrate, Helligkeitsdynamik und Investitionskosten schwinden. Die Zusatzinformation, nicht nur zu wissen wie intensiv die Wechselwirkungszone emittiert sondern wie die

Intensitäten örtlich verteilt sind, bietet Vorteile, die von der Industrie gern in Anspruch genommen werden. Laserschweißen, mit einer Vielzahl an Anwendungen und hohen Stückzahlen, bietet die Grundlage für viele Entwicklungen [48], [49], [50], [51] von denen einige einen Reifegrad bis zum Serieneinsatz nachweisen konnten [52], [53], [54], [55]. Weiterhin finden orts aufgelöste Messsysteme Einsatz beim Laserlöten [52], Laserschneiden [48] und Hybridverfahren [48].

Beim **Laserstrahlumschmelzen** wurde die orts aufgelöste Emissionsinformation vorwiegend genutzt, um die Schmelzbadfläche zu identifizieren und daraus auf die Dimension der umgeschmolzenen Spur zu schließen [8], [11], [56], [57]. Ein Beispiel dafür ist Gl.2.36 nach [56], eine Formel zur Berechnung der Schmelzbadtiefe auf Basis von Prozess- und Anlagenparametern wie Laserspotlänge  $L_s$  und -breite  $B_s$ , sowie der Vorschubgeschwindigkeit  $v$ . Zusätzlich gehen die Wärmeleitfähigkeit  $\alpha$ , ein Anpassungsfaktor  $Co$ , die Schmelztemperatur  $T_m$  und die sensorisch erkannte Schmelzbadfläche  $A_{SB}$  in die Rechnung ein.

$$UT = 2 \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot L_s}{v} \cdot \ln \left( \frac{T_m + Co \frac{A_{SB}}{B_s}}{T_m} \right)}. \quad (2.36)$$

Nicht nur die vom Schmelzbad emittierte Strahlung sondern auch die reflektierte Laserstrahlung gibt Rückschlüsse auf Prozessbedingungen [58]. In bisherigen Untersuchungen wurden Zusammenhänge zwischen Emissionen und Prozess- und Ergebnisgrößen aufgezeigt, welche aber in ihrem Funktionsumfang und teilweise ihrer Messgenauigkeit für einen industriellen Einsatz an anspruchsvollen Bauteilen nicht ausreichen.

Bisherige Untersuchungen zur Überwachung des **Beschichtungsprozesses** beschränken sich vorwiegend auf die Erkennung der Spurhöhe durch die Schmelzbadverschiebung, die durch eine lateral angeordnete Kamera überwacht wird [40], [59]. Ein Vertreter einer koaxial angeordneten CMOS-Kamera, die Veränderungen der Laserleistung sowie der Beschichtungsbreite erkennt, wird in [60] beschrieben. Der geringe Funktionsumfang dieser Systeme und die für Laserbeschichtungsverfahren mangelnde Helligkeitsdynamik der CCD-Kameras nach [8] machen die Neuentwicklung eines Prozessdiagnosesystems erforderlich.

### 2.2.3 Offline-Systeme zur nachgeschalteten Ergebnisprüfung

Die Topographievermessung von Laserbearbeitungen ist eine Kernaufgabe der Qualitätssicherung. Aus diesem Grund sind **Triangulationsverfahren** gängige Vertreter von nachgeschalteten Prüfsystemen. Das einfache Messprinzip, die hohe Messgenauigkeit und der große Bedarf aus der Industrie sind die Ursache für einen breiten Markt leicht modifizierter Seriengeräte. Es existieren Systeme mit einer Laserlinie [61] und mit mehreren Linien um Abschattung zu verhindern und 3D Analysen durchführen zu können [44], [55]. Weiterhin werden Ringprojektionen zur richtungsunabhängigen, koaxialen Nahtfolge [48] und die Kombination von Triangulation und Graustufenbildauswertung [62], [52] angeboten.

**Magnetische Systeme bzw. elektromagnetische Ultraschalköpfe** sind zur Erkennung von Rissen und Poren bei Tailored Blanks Schweißungen [63] und zur Prüfung von laserbeschichteten Ventilsitzringen bei Toyota im Serieneinsatz [19].

## **3 Laserstrahlumschmelzen und -beschichten im industriellen Umfeld**

Laserstrahlumschmelzen und -beschichten gewinnt aufgrund der derzeitigen industriellen Entwicklungstrends und der fallenden Laserkosten an Bedeutung. Laseroberflächenverfahren finden ihren Einsatz unter anderem in der Veredelung und Reparatur von Bearbeitungswerkzeugen z.B. für das Verarbeiten von hochfesten Stählen, aber auch für die lokale Optimierung von Bauteilen oder Bauteilkomponenten wie z.B. Motorenteile oder Turbinenschaufeln.

### **3.1 Industrielle Anwendungen zum Laserumschmelzen und -beschichten**

#### **3.1.1 Laserstrahlumschmelzen in der Industrie**

Die Veredelung von Komponenten durch das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes mit Laserstrahlung wurde im Aggregatebau bisher zum Umschmelzen von Nockenwellen und Kipphebeln zur lokalen Verschleißverbesserung eingesetzt [1], [64]. Vom Umschmelzen der Laufflächen gegossener Nockenwellen mit einer Linienfokussieroptik berichten [65] und [66]. Um die Lauffläche mit einer Überfahrt bearbeiten zu können, wurde die Spurbreite an die Nockengröße angepasst und über Strahlintensität und Vorschub ein Schmelzbad erzeugt, dessen Verweilzeit gewährleistet, dass Kugelgraphit in Lösung geht. Durch dieses Verfahren wurden Umschmelztiefen von 0,8mm über die gesamte Nocke mit einer Umschmelzbreite von 14,5mm erreicht. In einer Untersuchung von [67] wurden Ventilstege eines Dieselmotors zwischen Ein- und Auslass umgeschmolzen. Ziel war die Thermoschockrisanfälligkeit, in diesem thermo-mechanisch hoch beanspruchten Bereich zu reduzieren. Wegen der geringen Einschmelztiefe von ca. 2mm wurde jedoch keine Erhöhung der Standzeit erreicht.

### 3.1.2 Laserstrahlbeschichten in der Industrie

Das Laserstrahlbeschichten und Reparaturbeschichten von Turbinenschaufeln aus der **Luftfahrtindustrie** ist ein Beispiel von Bauteilen, die hohen Belastungen ausgesetzt sind und aufgrund von Sicherheitsfaktoren von sehr hoher Qualität sein müssen. Beim Beschichten von Führungskanten von Rolls-Royce Turbinenschaufeln [68], beim Panzern von Turbinenschaufelspitzen [69] sowie beim Reparaturschweißen von beschädigten Turbinenschaufeln [48], [70], [71], [72] eignen sich Laserbeschichtungen aufgrund der hohen Schichtqualität, des metallurgischen Verbundes und der geringen thermischen Belastung.

Im **Maschinen- und Werkzeugbau** werden Anlagenteile, deren Oberflächen im Betrieb stark beansprucht sind, laserbeschichtet um die Maschinenstandzeit zu erhöhen. Bei einem Maschinenausfall durch einen Defekt an einer Funktionsoberfläche kann diese ebenfalls reparaturlaserbeschichtet werden. Beispiele für mögliche Anwendungen im Maschinen- und Werkzeugbau sind das Beschichten von Schneidwerkzeugen [73] und Matrizen zum Tiefziehen von Blechen [74].

In der **Automobilindustrie** sind ebenfalls Beispiele für Laserbeschichtungsanwendungen bekannt. Das Beschichten von **Ventilsitzen** im Zylinderkopf als Ersatz für Schrumpfpresventilsitze ist dabei ein Verfahren, bei dem durch den metallurgischen Verbund der Wärmetransport im Zylinderkopf erhöht wird. Zusätzlich ermöglichen neue konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten der Ventilsitzgeometrie durch die Laserbeschichtung bessere Strömungsverhältnisse im Aggregat. Der verbesserte Wärmetransport und die optimierte Gasströmung wirken sich dabei positiv auf die Motorleistung aus. Das Laserbeschichten von Ventilsitzen bei Aluminiumzylinderköpfen wird von Toyota [19], [75], [76] und Nissan [79] seit geraumer Zeit durchgeführt. Bei Toyota wird eine Kupferbasislegierung mit einem oszillierenden CO<sub>2</sub>-Laserstrahl aufbeschichtet. Ein Patent zum Schutz einer Beschichtungslegierung auf Aluminiumbasis wurde von den Bayerischen Motoren Werken (BMW) angemeldet [77], was darauf schließen lässt, dass auch BMW Laserbeschichtungsanwendungen untersucht. Weiterhin können bei Motoren für Personen- und Lastkraftwagen die Dichtflächen der **Ventile** mit einer Schutzschicht aus einer Kobaltlegierung [33], einer Kupferlegierung [78], [79], [94], bzw. aus Stellite [33], [80] gepanzert werden. Gepanzerte Ventile sind resistenter gegen Temperaturwechselbelastung, Korrosion und abrasiven Verschleiß. Das Laserbeschichten von **Zylinderlaufbahnen** ist ebenfalls ein Beispiel einer thermisch und mechanisch stark beanspruchten

Oberfläche, deren Eigenschaft durch eine Laserbeschichtung verbessert werden kann [81].

## 3.2 Versuchsaufbau und Prozessdurchführung

Laseroberflächenveredelungen werden mit leistungsstarken Bearbeitungslasern im Multikilowattbereich durchgeführt. Zur Durchführung dieser Arbeit wurden Laser der Klasse 4 von Laserline, Rofin Sinar und Trumpf eingesetzt. Die Bearbeitungsanlage befindet sich aus Sicherheitsgründen in einer abgeschlossenen Zelle. Bestandteil der Bearbeitungsanlage ist ein Knickarmroboter der Firma KUKA mit hoher Wiederholgenauigkeit ( $\pm 0,2\text{mm}$ ) um das Werkstück oder die Laseroptik während der Bearbeitung zu bewegen. Dämpfe und Gase, die durch die Bearbeitung entstehen, werden um gesundheitliche Risiken zu minimieren, durch eine Absaugeinrichtung entfernt. Bei Grundwerkstoffen, die mit Luftsauerstoff reagieren, wird eine Schutzgasatmosphäre an der Wechselwirkungszone erzeugt. Realisiert wurde die Schutzgasatmosphäre beim Umschmelzen durch eine parallel zur Vorschubrichtung schleppend angebrachte Düse in unmittelbarer Nähe zur Wechselwirkungszone. Beim Beschichten wurde das Schutzgas durch den Gaskanal in der Pulverdüse aus Bild 13a zur Wechselwirkungszone geführt. In beiden Fällen wurde reaktionsträges Argongas verwendet, das die Wechselwirkungszone während der Bearbeitung abschirmen sollte. Der Transport des Laserlichtes wurde über ein Lichtleitkabel (LLK) und eine 90°-Umlenkoptik oder im Fall des Diodenlasers durch Direktbestrahlung umgesetzt.

### 3.2.1 Versuchsdurchführung der Umschmelzprozesse

Als **Grundwerkstoff** für Untersuchungen zum Laserstrahlumschmelzen wurde die Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg in Masseln nach DIN EN 576 und DIN 1712TE der Abmaße 320 x 72 x 53mm verwendet. Zur Erhöhung der Energieeinkopplung wurde in einem Vorbearbeitungsschritt eine wenige  $\mu$ -Meter dünne Coatingschicht auf Graphitbasis aufgetragen. Als **Strahlquelle** wurden zwei unterschiedliche Systeme benutzt. Zum einen wurde ein diodengepumpter Nd-YAG Laser des Herstellers Rofin Sinar mit 6kW Maximalleistung und einem runden Laserspot eingesetzt. Das

Strahlprofil ist im defokussierten Arbeitsabstand einer Gauß'schen Intensitätsverteilung ähnlich. Das Laserlicht wurde über ein Lichtleitkabel und eine Bearbeitungsoptik zum Werkstück geführt. Zum anderen wurde die Wechselwirkungszone durch einen Diodenlaser mit ebenfalls 6kW Maximalleistung der Firma Laserline direkt bestrahlt. Besonderheit bei diesem Laser waren die verstellbare Spotbreite von 10,94mm – 21,88mm und variable Intensitätsverteilung. Im überwiegenden Teil der Versuche wurde ein Spot von 16mm Breite und 4,72mm Länge mit einer Laserleistung von 3kW bestrahlt. In der Spotmitte wurde über ca. 6mm Breite die doppelte Energiedichte eingestellt. Das Strahlprofil bei minimaler Spotbreite von 10,94mm und maximaler Laserleistung von 6kW ist nach Herstellerangaben in der Fast-Axis eine Intensitätsverteilung nach Gauß und in der Slow-Axis ein Hutprofil. Eine detaillierte Charakterisierung der beiden Strahlquellen mit vermessener Intensitätsverteilung ist in Bild 17 gegeben.

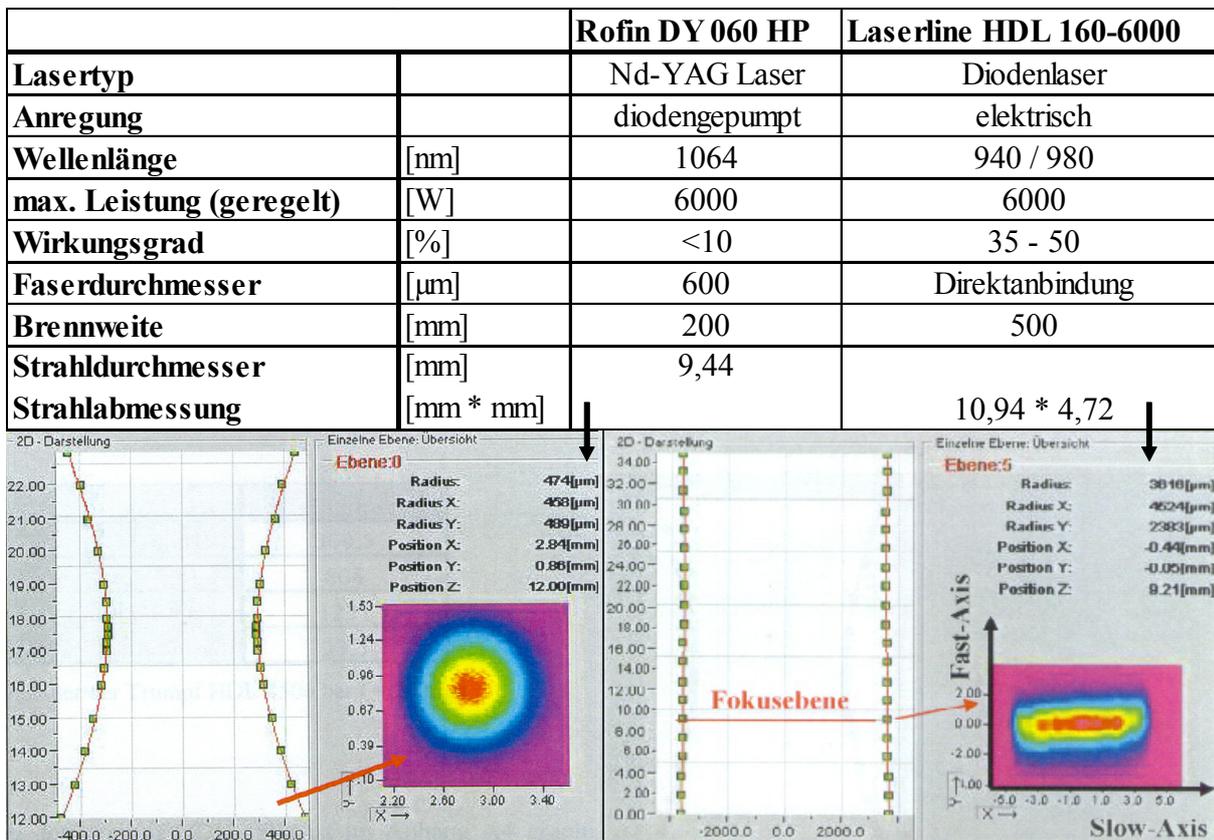


Bild 17: Übersicht der eingesetzten Strahlquellen zum Laserumschmelzen mit Strahlkaustikmessung in der Bearbeitungsebene.

Bedingt durch die Funktionsweise und Baugröße des Diodenlasers wurde dieser fest in die Anlage integriert und das Werkstück bewegt. Beim wirkungsgradschwächeren,

aber durch das Lichtleitkabel flexibleren Nd-YAG Laser wurde sowohl die Variante des bewegten Werkstückes als auch der bewegten Optik realisiert. Bild 18 zeigt (a) einmal das bewegte Werkstück am Beispiel des Diodenlasers und (b) die angestellte und bewegte Optik des Nd-YAG-Lasers. Die Optikneigung soll die Anlage vor reflektierender Laserstrahlung schützen. Zusätzlich ist in Bild 18b der Anbau der eingesetzten Sensorik dargestellt, dies entspricht einem vollständigen Versuchsaufbau für die Datenaufnahme beim Laserumschmelzen mit einem Nd-YAG Laser. Laseroberflächenveredeln erfordert deutlich größere Strahldurchmesser als Laserschweißen, wodurch beim Einsatz des Nd-YAG Lasers im defokussierten Abstand von Laseroptik zu Werkstückoberfläche gearbeitet wird. Der Diodenlaser, welcher ein zum Laserumschmelzen geeignetes Strahlmaß hat, verspricht hier eine geeignete und wirtschaftliche Strahlquelle zu sein.

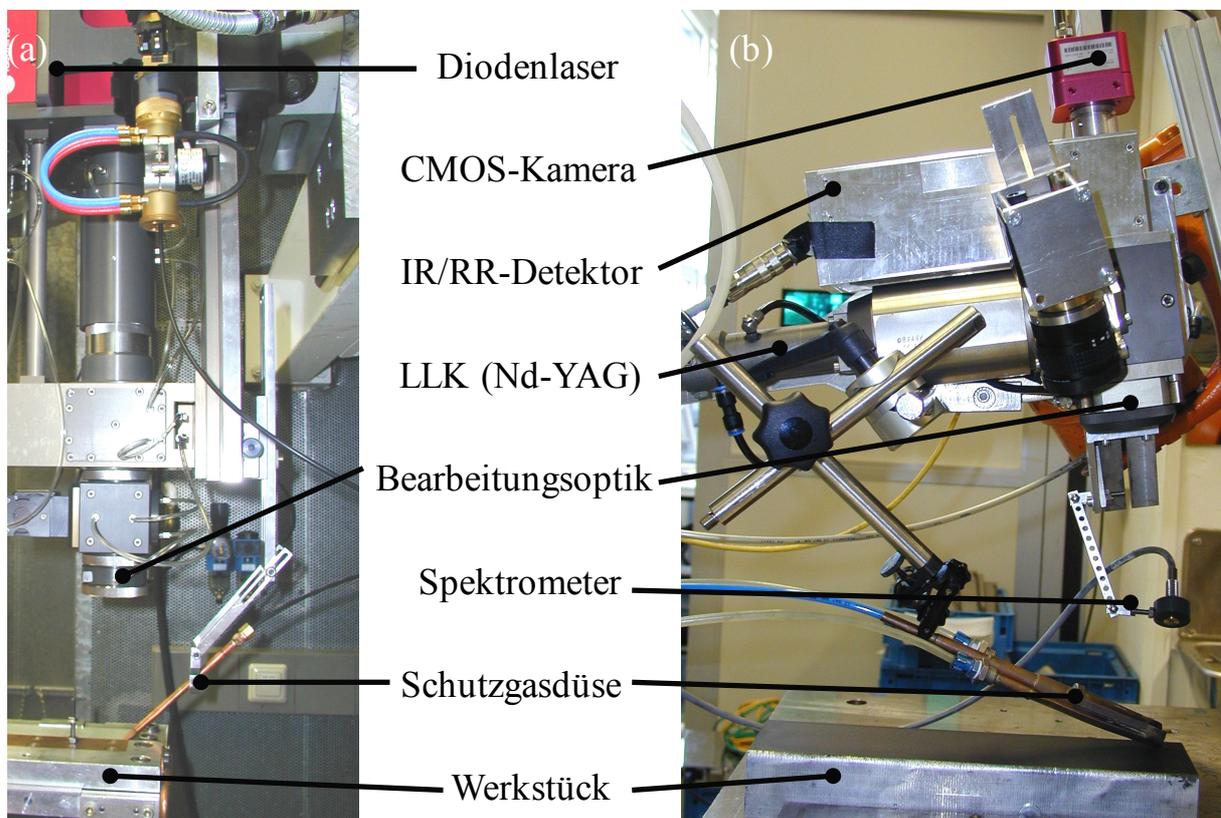


Bild 18: (a) Versuchsaufbau am Diodenlaser ohne Sensorik. (b) Versuchsaufbau mit Sensorik an der Standardoptik beim Rofin Laser. Sensorik bestehend aus CMOS-Kamera, Infrarotsensor (IR), Rückreflexsensor (RR) und Spektrometer.

### 3.2.2 Versuchsdurchführung der Beschichtungsprozesse

Durch die Zugabe von Zusatzwerkstoff erfährt der Beschichtungsvorgang im Gegensatz zum Umschmelzen sowohl anlagen- als auch prozesseitig einen erhöhten Grad der Komplexität. Der Zusatzwerkstoff wird koaxial zugeführt, um später das Potential eines richtungsunabhängigen Systems nutzen zu können. Das Prinzip des Laserstrahlbeschichtens mit koaxialer Pulverdüse und die schematische Darstellung des Pulver- und Laserweges aus Bild 13 verdeutlichen die Richtungsunabhängigkeit. Zusätzlich bietet die koaxiale Pulverdüse die Möglichkeit mit einer Kamera über den Weg der Laserstrahlung direkt Emissionen aus dem Prozess zu empfangen.

**Grundwerkstoff** war analog Kapitel 3.2.1 die Aluminiumlegierung AlSi10Mg, welche mit einem Pulver auf Kupferbasis beschichtet wurde. Als **Laseraggregat** wurde der Nd-YAG-Laser HL4006 der Firma Trumpf eingesetzt. Der Laser verfügt über ein TopHat-Profil in der Fokusebene, das sich mit zunehmendem Arbeitsabstand einer gaußähnlichen Intensitätsverteilung nähert. Die Kaustikmessung des HL4006 in Bearbeitungsebene ist in Bild 19 dargestellt. Das Laserlicht wurde durch ein Lichtleitkabel zur Bearbeitungsoptik mit adaptierter Pulverdüse gebracht. Der Bearbeitungskopf, der mit dem Knickarmroboter über das stehende Werkstück gefahren wird, ist in Bild 19 zu sehen. Zusätzlich ist die Sensorik zur Aufnahme der Prozessstrahlung adaptiert auf deren Funktionsweise in Kapitel 3.2.3 eingegangen wird.

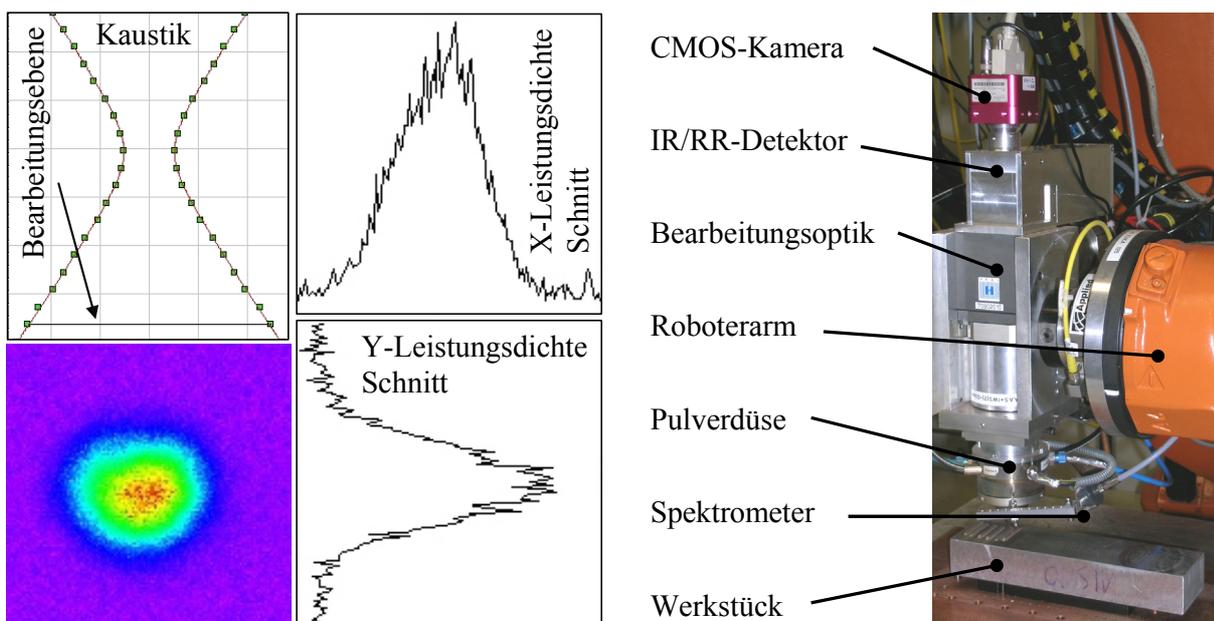


Bild 19: (links) Strahlkaustik und Leistungsdichten einer näherungsweise gaußförmigen Intensitätsverteilung des Bearbeitungslasers in Bearbeitungsebene und (rechts) Versuchsaufbau mit Sensorik zum Laserbeschichten.

### **3.2.3 Sensorik zum Erfassen der Prozessemissionen**

Kapitel 2.2 hat die Existenz verschiedener Prozessemissionen und entsprechender Sensoren zum Erfassen derselben verdeutlicht. Um einen umfassenden Überblick zu erhalten werden in dieser Arbeit integrale und orts aufgelöste In-Prozess-Sensoren, Hochgeschwindigkeits- und Thermographiekameras zur Entwicklung von Prozessverständnis und eine nachgeschaltete Ergebnisprüfung durch Lichtschnittmessungen als Vergleich zu den Online-Messungen eingesetzt.

#### **3.2.3.1 Online-Messungen mit integral messenden Sensoren**

Als Detektoren wurden ein Rückreflexsensor, ein Temperatursensor, ein Spektrometer und ein Körperschallsensor verwendet. Der gesamte Sensorikaufbau, adaptiert an einer Beschichtungsanlage einschließlich Überwachungskamera, ist in Bild 20a dargestellt.

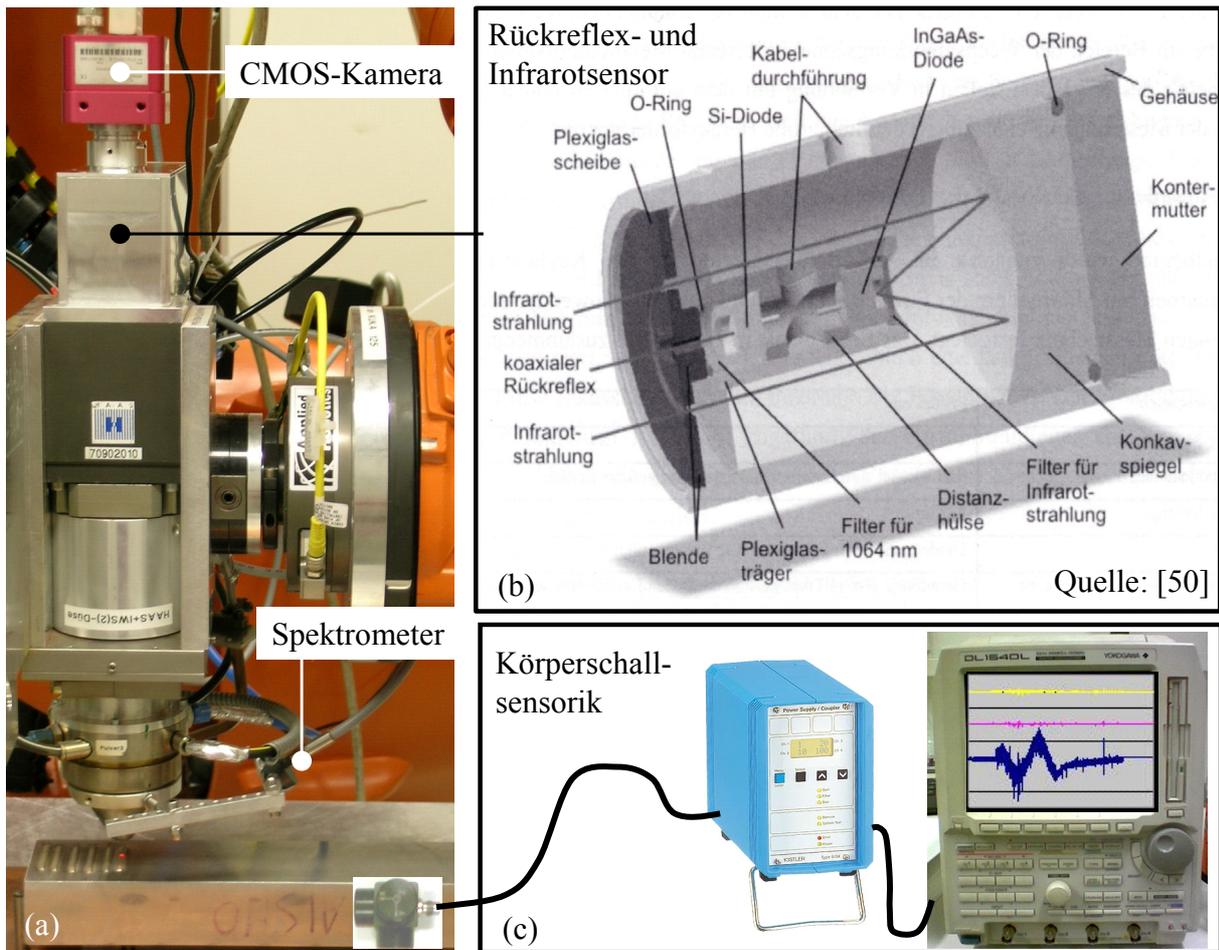


Bild 20: Integrale und ortsauflösende Sensorik an der Standardbearbeitungsoptik zum Laserstrahlbeschichten. (a) Beschichtungskopf inkl. Sensorik, (b) Prinzipbild RR- und IR-Detektor und (c) Prinzipbild Körperschallmessung.

Die Vereinigung des **Rückreflex- und des Infrarotsensors**, dargestellt in der Sensoreinheit aus Bild 20b, stellt dabei ein koaxial zur Laserstrahlung messendes, richtungsunabhängiges System dar. Eine Photodiode (SI-Diode) mit vorgeschaltetem Interferenzfilter für die Laserstrahlung agiert als Rückreflexsensor, dessen Strahlung die zentrale Blendenöffnung passiert. Um ein richtungsunabhängiges Temperatursignal zu erhalten, gelangen die Infrarotemissionen über eine Ringblende und einen sphärischen Spiegel auf eine infrarotempfindliche Photodiode (InGaAs-Diode). Ein Kantenfilter im Strahlengang des Temperatursignals bei 1090nm verhindert störende Emissionen, vorwiegend aus dem infraroten Bereich und der Laserwellenlänge.

Ein lateral angebrachtes **Spektrometer** mit Messbereich von 200nm bis 1000nm wurde über den Prozessverlauf durch vier Kurven ausgewertet, die auf Basis markanter Wellenlängen im Gesamtspektrum ausgesucht wurden. Die

Messdatenaufzeichnung wurde auf diese vier charakteristischen Wellenlängen beschränkt um die Abtastrate zu erhöhen. Bild 21a zeigt ein solches Gesamtspektrum mit charakteristischen Wellenlängen bei 450nm, 615nm, 729nm und 947nm. In Bild 21b ist für diese Wellenlängen der Signalverlauf über dem Prozessverlauf aufgetragen. Zur Auswertung von Spuren mit konstanten Parametern wurde der Signalverlauf ohne Anfangs- und Endbereich gemittelt und den Ergebnissen der Schliffpräparation gegenüber gestellt.

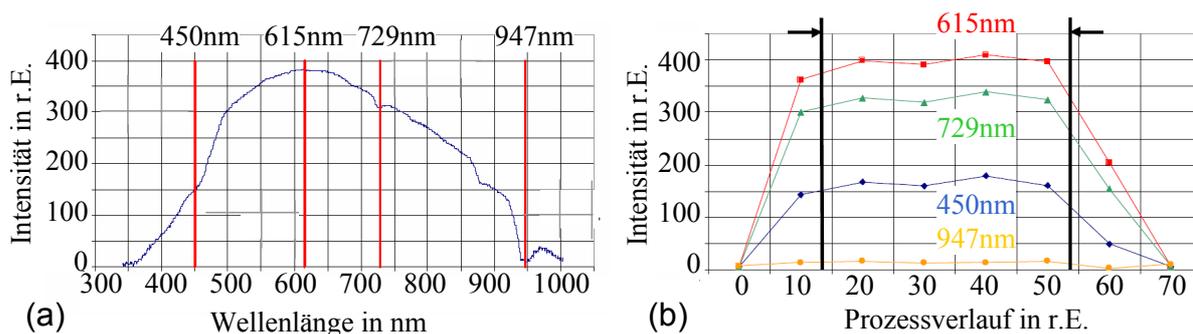


Bild 21: (a) Momentaufnahme eines charakteristischen Gesamtspektrums eines Umschmelzprozesses, (b) Spektrale Emissionen von 4 charakteristischen Wellenlängen über den gesamten Prozessverlauf [Quelle: Dr. Jörg Höschele, DaimlerChrysler AG, persönlicher Kontakt].

Die Überwachung von **Körperschallemissionen** zur Risserkennung wurde durch einen Beschleunigungssensor, der mit dem Werkstück verbunden war, realisiert. Bild 20c zeigt wie das Messsignal des 500g Beschleunigungssensor der Firma Kistler (K-SHEAR<sup>®</sup> TRIAXIAL-BESCHLEUNIGUNGSSENSOR) mittels eines Ladungsverstärkers (Vier-Kanal Piezotron<sup>®</sup>-Kuppler der Firma Kistler) verstärkt auf dem Speicheroszilloskop (Yokogawa DL1540L) visualisiert und dokumentiert wurde. Die Abtastfrequenz betrug dabei 5000Hz.

### 3.2.3.2 Online-Messungen mit ortsauflösenden Sensoren (Kameras)

Der in Kapitel 2.2.2 angedeutete Trend in der Kameraentwicklung zu höherer Bildwiederholrate und Helligkeitsdynamik spiegelt sich auch in dieser Arbeit wieder. Während in [8] noch eine CCD-Kamera mit einer Bildwiederholrate von 25Hz zum Einsatz kam, wurden in dieser Arbeit zwei CMOS Kameras und eine HDR-Kamera getestet. Momentaufnahmen und einige Kameradaten der getesteten Chips sind in

Tabelle 3 zusammengefasst und veranschaulichen den Entwicklungsfortschritt. HDRC (High Dynamik Rang CMOS) stellt dabei eine CMOS Kamera mit stark erweitertem Dynamikbereich [82] aber zum Zeitpunkt dieser Arbeit einem problematischen "rolling shutter" dar. Die schnellen Schmelzbadbewegungen beim Laserbeschichten wurden durch das zeitlich versetzte Auslesen der Chipzeilen (rolling shutter) der HDRC-Kamera nicht immer korrekt dargestellt. Dadurch konnte die Kamera trotz ihres hohen Potentials in der Bildqualität beim Beschichten nicht eingesetzt werden. Die Perspektive der Kamera war beim Umschmelzen (siehe Bild 18) und beim Beschichten (siehe Bild 20) koaxial zur Laserstrahlung. Durch die Pulverdüse ist das Sichtfeld beim Laserstrahlbeschichten eingengt.

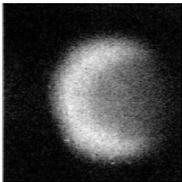
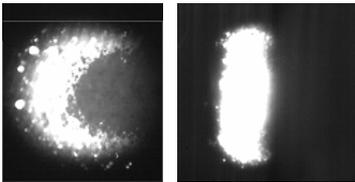
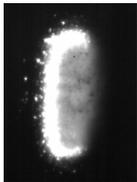
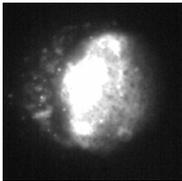
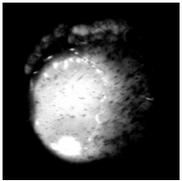
Hersteller/ Kamerabezeichnung	Fillfactory FUGA 100 Log response CMOS APS	Photonfocus MV-D752-160	hema Seelector ICAM-HD1
Kamera- abbildung			
Momentbild Laserrumschmelzen			
Momentbild Laserbeschichten			
Typ	CMOS (log)	CMOS (LinLog)	CMOS (HDRC)
Chipgröße	1024*1024	752*582	768*469
Dynamikbereich	>120dB	>120dB	>140dB

Tabelle 3: Kameradaten der eingesetzten Sensoren (kommerziell erhältliche Standardkomponenten). Beispielhafte Momentaufnahmen zum Laserstrahlumschmelzen und -beschichten.

Basierend auf dem Kameravergleich aus Tabelle 3 wurden folgende Kameras koaxial zur Strahlung des Bearbeitungslasers eingesetzt, siehe Bild 22.

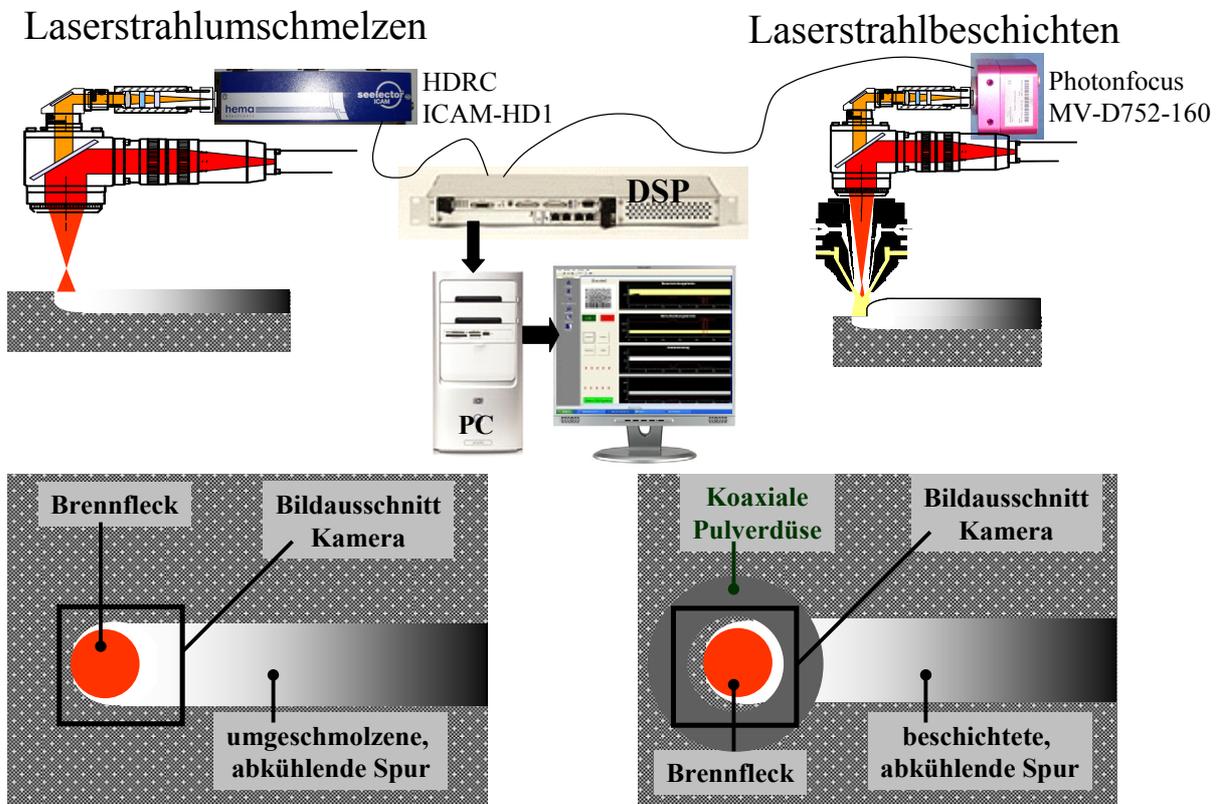


Bild 22: Ausgewählte Hardware für die ortsauflösende Sensorik mit zugehörigem Bildausschnitt (links) beim Laserstrahlumschmelzen und (rechts) beim Laserstrahlbeschichten.

In beiden Anwendungen wurde mit optischen Filtern sichergestellt, dass keine reflektierte Laserstrahlung den Chip erreicht. Weiterhin waren im Strahlengang der Kamera Strahlteilerwürfel zum Auskoppeln von Emissionen für die Rückreflex- und Infrarotdetektoren. Die Bildqualität wurde dadurch nur minimal beeinträchtigt. Beispiele solcher Versuchsaufbauten sind in Bild 18 zum Laserumschmelzen und in Bild 20 zum Laserbeschichten dargestellt.

Auswerteeinheit der erfassten Bildsequenzen war für beide Prozesse und Kameras ein Echtzeit-DSP-Board, das CVS easy der Firma Hema, mit der angepassten Bildverarbeitungsbibliothek hilbil [83]. Dieses System ermöglicht es, durch spezielle Erweiterungsmodule, in jeder Momentaufnahme einer Bildsequenz drei Graustufenschwellenwertflächen zu berechnen und zwei verschiedene Geometrien (blob = binary large object) zu identifizieren und hinsichtlich

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| - Flächeninhalt             | - Umfang                    |
| - Maximaler Ausdehnung      | - Minimaler Ausdehnung      |
| - Ausdehnung in X-Richtung  | - Ausdehnung in Y-Richtung  |
| - Schwerpunkt in X-Richtung | - Schwerpunkt in Y-Richtung |
| - Formfaktor                | - Außermittigkeit           |
| - Winkel                    |                             |

zu berechnen. Die Filmsequenzen und Geometrieberechnungen können für jeden Bearbeitungsvorgang gespeichert werden. Identifikationskriterien solcher Geometrien ist eine Kombination aus Graustufenschwellenwert und Graustufengradient. An den jeweiligen Prozess angepasst werden beim Laserstrahlumschmelzen und -beschichten zwei Geometrien erkannt, deren Eigenschaftswerte die Basis für verschiedene Indikatoren der Prozessüberwachung sind. Beim Laserstrahlumschmelzen wird die helle Fläche in Form einer Sichel, der Bereich in dem das Coating noch näherungsweise existiert und absorbiert, ausgewertet. Erkannt wird die Sichel durch den Temperatursprung am Rand der Wechselwirkungszone im Vergleich zur kalten Umgebung und durch den Unterschied im werkstoffabhängigen Emissionskoeffizienten zum gleichwarmen Schmelzbad. Beim Schmelzbad wird der Emissionssprung von flüssig zu fest genutzt um den verflüssigten Bereich zu erkennen und zu markieren, siehe Bild 23a. Beim Laserstrahlbeschichten werden so die Kante zum flüssigen Schmelzbad und die Spurdimension oberhalb einer Grenztemperatur vermessen. Zusätzliche Graustufen-Schwellenwertflächen wurden speziell beim Beschichten genutzt um den heißen Bereich innerhalb des Schmelzbades zu beobachten, siehe Bild 23b. Eine Detaillierung der Erkennungsmechanismen beim Laserstrahlbeschichten wird in Kapitel 4.2.1.2 gegeben.

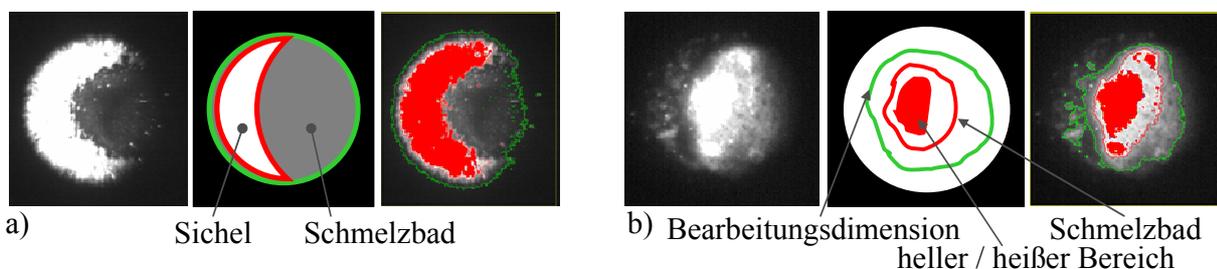


Bild 23: Beispielhafte Momentaufnahmen, Erkennungsprinzip der zu identifizierenden Geometrien in den Kamerabildern und markierte Momentaufnahmen zum (a) Laserstrahlumschmelzen und (b) Laserstrahlbeschichten.

### 3.2.3.3 Messungen zur Entwicklung von Prozessverständnis

Zum Aufbau von Prozessverständnis und zur Interpretation der Bildsequenzen der CMOS-Kamera wurde der Laserbeschichtungsprozess mit einer **Hochgeschwindigkeitskamera** gefilmt. Um die Neigung der Spurfront zu ermitteln wurde die Hochgeschwindigkeitskamera waagrecht und seitlich auf die Spurfront schauend mit einem Beleuchtungslaser als Zusatzbeleuchtung installiert (siehe Bild 24b). Zur Interpretation CMOS-Aufnahmen wurde die Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Perspektive von schräg vorne aufgebaut, um Fluktuationen und Strömungen im Schmelzbad zu erkennen (siehe Bild 24a). Die Hochgeschwindigkeitskamera, eine MotionPro™ HS-4 der Firma REDLAKE, wurde mit Bildwiederholraten bis zu 4500Hz betrieben, um die Vorgänge in der Wechselwirkungszone zuverlässig ableiten zu können.

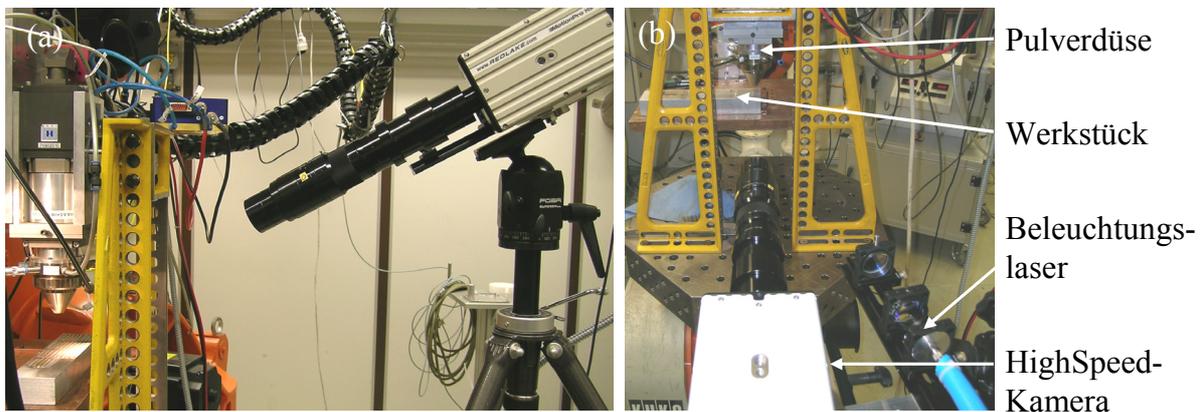


Bild 24: Versuchsaufbau und Sichtweise der Hochgeschwindigkeitskamera.

Zur Interpretation der Emissionen, speziell der verschiedenen Emissionskoeffizienten beim Laserstrahlumschmelzen, wurden Aufnahmen mit einer Thermographiekamera durchgeführt. Bei Aufnahmen während des Bearbeitungsprozesses muss analog [8] im optischen Weg ein Sperrfilter im Laserwellenlängenbereich installiert werden, um die Auswertung der Temperaturstrahlung vor reflektierter Laserstrahlung und den Chip vor Zerstörung zu schützen. Durch diesen Filter können bei Aufnahmen während des Prozesses nur relative Unterschiede der Emissionskoeffizienten aber keine absoluten Werte ermittelt werden. Um Absolutwerte für Emissionskoeffizienten zu erhalten, wurden Aufnahmen bei unterschiedlichen Werkstofftemperaturen von Grundwerkstoff und Coating im Vergleich zum Schwarzen Strahler durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Coatingzustände nach der Laserbearbeitung vermessen. Der Werkstoff wurde dazu mit einer Heizplatte schrittweise auf ca. 300°C erhitzt und die

Temperatur mit einem taktilen Thermometer überprüft. Über die gemessene Werkstofftemperatur und die Emissionsbilder der Thermographiekamera konnte der Emissionskoeffizient der verschiedenen Oberflächen ermittelt werden. Bild 25 zeigt den Versuchsaufbau und ein beispielhaftes Emissionsbild. Als Thermographiekamera wurde die Thermovision 900 Series der Firma Flir Systems GmbH (früher AGEMA) mit einer vom Kamerahersteller angegebenen Messgenauigkeit von  $0,08^{\circ}\text{C}$  bei  $30^{\circ}\text{C}$  eingesetzt.

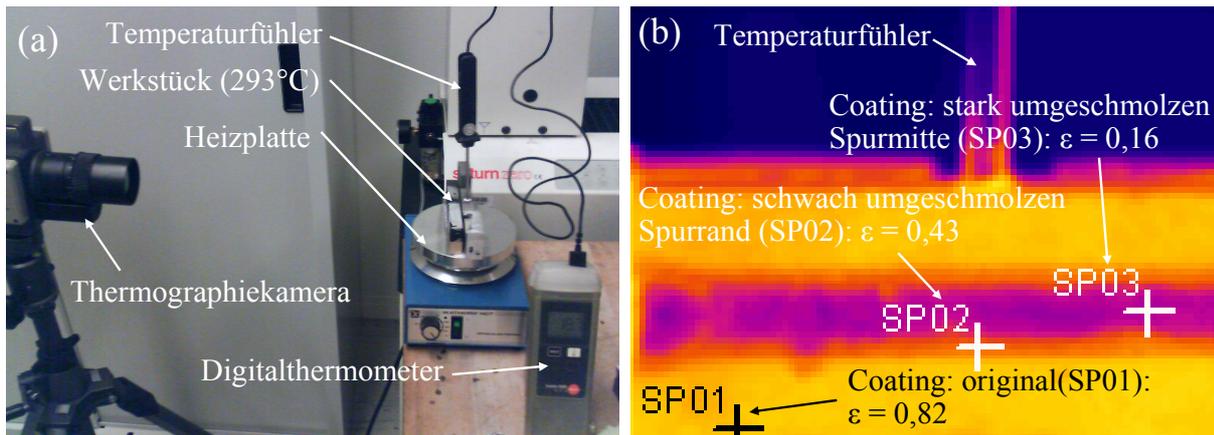


Bild 25: (a) Versuchsaufbau der Thermographiekamera und (b) beispielhafte Momentaufnahme einer umgeschmolzenen Spur bei einer Werkstofftemperatur von  $293^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.3.4 Nachgeschaltete Ergebnisprüfung durch Offline-Triangulation

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung eines Online-Prozessdiagnose-Systems. Aus diesem Grund wird auf die Triangulationsmessung hier nur kurz eingegangen. Dennoch wurde für die Vermessung von Laserbeschichtungen mit Parameteränderungen während des Prozesses ein nachgeschaltetes Triangulationssystem verwendet. Der Triangulationssensor VIRO<sup>WSI</sup> der Firma Vitronic erstellt mit einer Bildwiederholfrequenz von 480Hz und einer Auflösung von  $0,01\text{mm}$  die Ist-Kurve der sich ändernden Beschichtungsdimension. Damit konnte nicht nur ein gemittelter Sensorwert einem Querschliff gegenüber gestellt werden, sondern der erkannte Signalverlauf mit dem realen, durch Triangulation vermessenen, Höhen- und Breitenprofil verglichen werden.

### **3.3 Fehlerschwerpunkte und Anforderungen an die Qualitätssicherung**

Laserstrahlumschmelzen und –beschichten im Automobilbau wird sehr häufig zur Veredelung von Antriebskomponenten verwendet. Entsprechend hoch sind die Qualitätsanforderungen an das Verfahren und die Qualitätskontrolle. Bei Laseroberflächenverfahren ist es häufig erforderlich, dass jede einzelne Bearbeitungsstelle die entsprechenden Qualitätsmerkmale erfüllt. Jede Bearbeitung ist den entsprechenden Belastungen ausgesetzt und schon das Versagen eines Teilbereiches, z.B. eines Teils einer Beschichtungsraupe, kann die gesamte Beschichtung bis hin zum gesamten Bauteil gefährden. Ebenfalls werden Laseroberflächenverfahren in Fällen eingesetzt, bei denen die Eigenschaften des Grundwerkstoffes den gestellten Belastungen nicht mehr gerecht werden. Dabei muss die Qualität der Oberflächenveredelung gewährleistet sein, da beim Versagen nicht nur die veredelte Stelle zerstört wird, sondern ein gravierender Angriff auf den Grundwerkstoff, z.B. einer Motor Komponente erfolgen kann, was bis zum Motorschaden führt.

Folge der Einsatzgebiete von Laserstrahlumschmelz- und Beschichtungsverfahren ist, dass jedes Bearbeitungsergebnis einer Hundert-Prozent-Kontrolle unterworfen werden muss. Diese Qualitätskontrolle kann im automatisierten Online-, im Offline-Verfahren oder durch humane Sichtprüfungen durchgeführt werden. Das Online-Verfahren ist hierbei zu favorisieren weil es in Echtzeit eine konstante und objektive Beurteilung verspricht. Da solche Oberflächenverfahren im Automobilbereich, vorwiegend im Aggregatebau, eingesetzt werden, ist die Bearbeitungszeit eines Bauteils ein wirtschaftlicher Faktor. Bei Online-Verfahren, die während der Bearbeitung prüfen, entsteht kein Zeitverzug durch die Qualitätssicherung. Dies wäre bei einem Offline-Verfahren nur dann der Fall, wenn das Offline-Verfahren mindestens so schnell prüft wie produziert wird. Ein Offline-Verfahren hat außerdem den Nachteil, dass häufig eine zusätzliche Prüfstation benötigt wird. Diese erfordert Platz und eine Infrastruktur wie Einlegeroboter und ähnliches. Aber der entscheidende Faktor, der für eine Online-Prüfung bei Oberflächenverfahren spricht, ist die Tatsache, dass bei Oberflächenverfahren eine Vielzahl von Qualitätsgrößen unterhalb der Werkstückoberfläche liegen. Eine menschliche Sichtprüfung ist somit nicht in der Lage eine vollständige Bewertung abzugeben. Offline-Systeme, die unter die Oberfläche sehen können, also über Triangulationssensorik hinausgehen wie Ultraschall oder Röntgen, sind in der Anschaffung sehr teuer und benötigen im Allgemeinen viel Zeit. Damit ist das Ziel,

die technische Machbarkeit vorausgesetzt, ein Online-Qualitätssicherungssystem einzusetzen verständlich.

Ein solches Online-System muss allerdings vielen Anforderungen entsprechen. Das System muss alle geforderten Qualitätsmerkmale erkennen, denn eine nicht erkannte Qualitätsgröße kann eine Offline-Prüfstation erforderlich machen. Diese Tatsache würde die Gesamtprüfzeit und damit die Wirtschaftlichkeit der gesamten Bearbeitung in Frage stellen.

Da es sich um ein Online-System handelt, wird das System in die Bearbeitungsanlage integriert. Damit sind Vorgaben an die Kompaktheit und Integrierbarkeit des Systems gestellt. Ein koaxiales System, das die schon vorhandenen optischen Wege der Laserstrahlung nutzt, ist hierbei ideal in Bezug auf Störkontur und Richtungsunabhängigkeit. Weiterhin sind Zuverlässigkeit und Konstanz des Systems, auch unter den messtechnisch widrigen Bedingungen einer Serienproduktion, zu erfüllen. Ein wichtiger Punkt in der Produktion von Wirtschaftsgütern sind die Investitionskosten, die ein Qualitätssicherungssystem mit sich bringt. Es kommen also für den späteren Serieneinsatz nicht alle Sensoren in Frage, da einige in ihrer Bauform ungeeignet und bei anderen die Investitionskosten zu hoch sind. In dieser Arbeit wird an wenigen Stellen auf solche Systeme, wie Thermographiesysteme und Hochgeschwindigkeitskameras zurückgegriffen. Diese dienen nur der Entwicklung des Prozessverständnisses und sind nicht als potentielle Sensoren für ein Echtzeitsystem vorgesehen. Um die zu testenden Sensoren einzuschränken, wurde eine Recherche zum Potential verschiedener Sensoren durchgeführt.

Ein Online-Qualitätssicherungssystem hat die Aufgabe die Bearbeitungsdimensionen und die Prozess- und Ergebnisfehler zu erkennen. Da diese sich beim Umschmelzen von denen beim Beschichten unterscheiden wird im Folgenden getrennt darauf eingegangen.

### **3.3.1 Qualitätsmerkmale beim Laserstrahlumschmelzen**

Eine umgeschmolzene Spur zeichnet sich durch einen Bereich im Grundwerkstoff aus, der sehr homogen ist. Diese Eigenschaften gilt es sicherzustellen. Dazu kann man die Qualitätsgrößen einmal in die Sicherstellung der Bearbeitungsdimension und zum zweiten in die Erkennung von Prozessfehlern einteilen. Die Bearbeitungsdimension

beinhaltet die Umschmelztiefe und Umschmelzbreite. Es besteht zwar ein direkter Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und der Bearbeitungsdimension, dennoch sollen hierbei absolute Größen in ihren Toleranzen durch eine Ergebnisbewertung sichergestellt werden. Diese Aufgabe ist deutlich aufwendiger als Störungen im Prozess zu messen und zu analysieren. Die Erkennung von Störungen ist im Allgemeinen messtechnisch einfach, da sich Prozessstörungen durch spontane, kurzzeitige, relative Abweichungen vom Normalprozess auszeichnen. Solche Störungen entstehen zum einen durch Fehler im Grundwerkstoff (z.B. Lunker) oder durch eine fehlende oder beschädigte Vorbearbeitung (z.B. Coating- oder Konturfehler). In Einzelfällen können sich falsche Prozessparameter auch als qualitätszerstörende Faktoren auswirken wie z.B. eine mangelhafte Schutzgaszufuhr.

### **3.3.1.1 Umschmelzdimensionen**

Als Umschmelzbreite ist die Breite der umgeschmolzenen Spur an der Oberfläche definiert. Diese Breite muss überwacht werden um sicherstellen zu können, dass die Sollkontur umgeschmolzen ist, um die gewünschte Homogenisierung an allen geforderten Stellen zu gewährleisten. Die Umschmelzbreite soll absolut in metrischen Größen innerhalb einer Toleranz von  $\pm 0,2\text{mm}$  erkannt werden.

Die zweite Umschmelzdimension ist die Umschmelztiefe. Für die Tiefe der Spur gilt ähnliches wie für die Spurbreite. Es muss eine Mindestspurtiefe erreicht werden, um die Sollkontur der Bearbeitung zu erreichen. Die Umschmelztiefe ist als die maximale Tiefe, die üblicherweise in der Spurmittle zu finden ist, definiert. Diese Spurtiefe soll wie die Spurbreite absolut erkannt werden. Bei der Einhaltung der Spurtiefe darf auch nicht mehr umgeschmolzen werden als die Solltiefe vorgibt, da es sonst zu Deformationen an der Oberfläche kommen kann. Die Umschmelztiefe soll innerhalb einer Toleranz von  $\pm 0,2\text{mm}$  erkannt werden.

### **3.3.1.2 Prozess- und Bearbeitungsfehler**

Zur Erhöhung der Energieeinkopplung und damit zur Verbesserung des Wirkungsgrades wird der Aluminiumgrundkörper an der Stelle, die umgeschmolzen werden soll, mit einem absorptionserhöhendem Coating beschichtet. Dieses Coating ist eine dünne Schicht, welche die Aufgabe hat, die Laserstrahlung besser zu absorbieren und damit

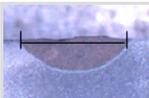
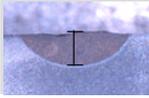
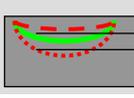
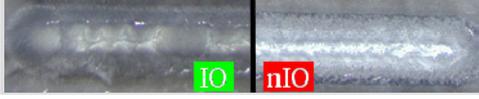
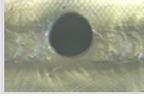
schneller und mehr Energie ins Werkstück einzutragen. Dieses Coating wird in einem Vorbearbeitungsschritt aufgetragen und ist nicht mit den Laserbeschichtungen dieser Arbeit gleichzusetzen. Da es sich beim Auftragen des Coatings um einen Bearbeitungsschritt handelt, der vor dem eigentlichen Umschmelzprozess stattfindet, besteht die Gefahr, dass ein korrekt aufgetragenes Coating durch äußere Einflüsse wie Bauteiltransport beschädigt wird. Ebenfalls können beim Auftragen des Coatings Fehlstellen in der Schicht auftreten. Derartige Coatingfehler können das Prozessergebnis und damit die Bearbeitungsqualität in Form einer veränderten Einkopplung und damit verändertem Energieeintrag beeinträchtigen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte ermittelt werden, dass Fehler im Coating, bis zu einem Millimeter Ausdehnung in Vorschubrichtung aufgrund der Trägheit der Wärmeleitung keinen Einfluss auf den Umschmelzprozess haben. Es dürfen jedoch nicht mehrere solcher Fehlstellen vorhanden sein. Ziel ist es, einzelne Coatingfehler mit Einfluss auf die Bearbeitungsqualität zu erkennen aber auch kleinere Coatingfehler zu registrieren. Über die Anzahl solcher kleiner Kratzer im Coating soll ebenfalls ein Fehler gemeldet werden sobald ein Qualitätsmangel vorliegt.

Aluminium hat die Eigenschaft mit zunehmender Temperatur Wasserstoff aufzunehmen. Für den Fall, dass die Wechselwirkungszone nicht von einer reaktionsträgen Schutzgasatmosphäre eingeschlossen ist, entsteht schon während des Umschmelzens eine Oxidschicht auf dem Schmelzbad sowie Wasserstoffporen in der umgeschmolzenen Zone. Diese weiße und raue Oberfläche, die auch [84] festgestellt hat, ist nur bei Oberflächen, die nachbearbeitet werden unproblematisch. Stets ein Problem sind die in der umgeschmolzenen Spur eingeschlossenen Wasserstoffporen, die sich negativ auf die Homogenität der Spur auswirken.

Bei Gussteilen aus Aluminium besteht die Gefahr von eingeschlossenen Gasvolumina, so genannten Lunkern. Kleine Lunker können beim Umschmelzen so homogenisiert werden, dass keine Fehlstellen mehr vorhanden sind. Größere Lunker bewirken durch die eingeschlossenen Gasvolumen, die beim Umschmelzen austreten, ein Absinken der Spur im Bereich des Lunkers. Weiter kommt es durch die verringerte Grundwerkstoffmasse im Lunkerbereich und die erhöhte Absorptionsfläche durch die Wände der Gaseinschlüsse zu einer verstärkten Temperaturentwicklung. Die höhere Temperatur kann die homogene Oberfläche in diesem Bereich zerstören. Lunker, die sich negativ auf das Bearbeitungsergebnis auswirken, müssen erkannt werden. Die kritische Lunkergröße, also die Grenzgröße der zu erkennenden Lunker, liegt je nach Entfernung zur Oberfläche bei ca. 300µm.

Oberflächenbearbeitungen werden sehr gezielt eingesetzt um bestimmte Stellen an die geforderten Arbeitsbedingungen anzupassen. Durch falsche Roboterbahnen, Fehler in der Spannvorrichtung oder falsche Abmaße des Bauteils kann es vorkommen, dass ein Umschmelzvorgang nicht an der korrekten Position durchgeführt wird. Ein solcher Fehler führt nicht nur zu einer ungenügenden Bauteilveredelung, sondern durch die Energiezufuhr an der falschen Position kann das gesamte Bauteil zerstört werden. Für einen korrekten Umschmelzprozess muss die Lage des zu bearbeitenden Bauteils durch eine Kontrolle der Bearbeitungsposition überwacht werden.

In der nachfolgenden Abbildung sind alle qualitätsrelevanten Merkmale mit den jeweiligen Toleranzen zusammengefasst.

Merkmal	Prinzip und Fehlerauswirkung	Toleranz
Spurbreite	 <p>Spurbreite zu groß: Vorbearbeitungskontur wird deformiert Spurbreite zu gering: Oberfläche wird nicht vollständig umgeschmolzen</p>	+/- 0,2mm
Spurtiefe	  <p>Spurtiefe zu gering: geforderte Schichttiefe nicht vorhanden Spurtiefe zu groß: Vorbearbeitungskontur wird deformiert</p>	+/- 0,2mm
Coatingfehler	 <p>Coatingfehler verursachen durch abgeschwächte Einkopplung eine verringerte Umschmelztiefe</p>	ca. >1mm
Oxidation	 <p>Aluminium reagiert mit dem Luftsauerstoff und bildet Wasserstoffporen</p>	nicht zulässig
Lunker	 <p>Lunker zerstören die Spurhomogenität und damit die Bearbeitungsqualität</p>	>300µm
Lagekontrolle	 <p>Oberflächenqualität ist an der geforderten Position nicht gegeben bzw. Energiezufuhr an den falschen Bereichen führt zur Bauteilzerstörung</p>	Kontur abhängig

Oberflächenkontur: beeinflusst die Oberflächenqualität und lokal die Schichtdicke

Bearbeitungszeit: wird über Triggerpunkte und Systemuhr überwacht

Poren: können nur in nach geschalteter Offline-Prüfung zuverlässig erkannt werden

Bild 26: Zu überwachende Qualitätsmerkmale beim Laserstrahlumschmelzen.

### 3.3.2 Qualitätsmerkmale beim Laserstrahlbeschichten

Beim Laserstrahlbeschichten soll punktgenau ein Werkstoff mit idealen Eigenschaften auf einen Grundwerkstoff aufgebracht werden. Es wird häufig ein Bauteil aus leichtem und in seinen Grenzen strapazierfähigem Grundwerkstoff konstruiert. Dieses wird an wenigen, besonders thermisch und mechanisch belasteten Stellen, mit einem dafür geeigneten Material beschichtet. So kann man z.B. einen preiswerten, leichten Aluminiumkörper, der mit einer sehr stabilen funktionellen Oberfläche beschichtet ist, in hoch beanspruchten Bereichen einsetzen. Aus diesem Vorhaben lassen sich die zu überwachenden Merkmale ableiten. Die Laserbeschichtung muss an den benötigten Stellen am Bauteil in den entsprechenden Abmaßen vorhanden sein. Die Beschichtung muss fest mit dem Grundwerkstoff verbunden sein, damit sie sich auch bei extremen oder schwingenden Beanspruchungen nicht vom Grundwerkstoff ablöst. Die Beschichtung muss auch in dieser Verbindung ihre definierten Eigenschaften beibehalten und frei von Fehlern sein. Damit lassen sich die Qualitätsmerkmale wieder in zu bewertende Spurdimensionen und zu erkennende Spurfekte einteilen.

#### 3.3.2.1 Spurdimensionen

Die Spurbreite ist definiert als die maximale Breite der Spur im Übergang von Beschichtungswerkstoff zu Grundwerkstoff. Diese Breite muss überwacht werden um gewährleisten zu können, dass die Teile der Oberfläche, die eine Beschichtung erfordern, flächenmäßig abgedeckt sind. Die Beschichtungsbreite soll innerhalb einer Toleranz von +/- 0,2mm erkannt werden.

In vielen Fällen wird eine laserbeschichtete Spur im Anschluss nachbearbeitet. Hier wird ein gewisser Teil der Spurbreite abgetragen um eine konstante Oberfläche zu erhalten. Bei einer Oberfläche, die aus mehreren Überlappspuren nebeneinander besteht, kann über die Spurbreite sichergestellt werden, dass eine durchgängige Oberfläche mit erforderlicher Schichtdicke vorliegt. Bei Beschichtungen, die in vorbereitete Konturen eingearbeitet werden, wird über die Beschichtungshöhe in Kombination mit der Breite sichergestellt, dass die erwünschte Kontur nach der Nachbearbeitung korrekt vorhanden ist, weil zuvor ausreichend Material aufgetragen worden ist. Die Beschichtungshöhe soll analog zur Breite in einer Toleranz von +/- 0,2mm erkannt werden.

### 3.3.2.2 **Prozess und Bearbeitungsfehler**

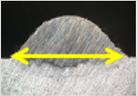
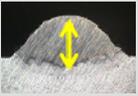
Die wohl wichtigste Größe neben der Spurbreite und -höhe ist die Aufmischung. Die Aufmischung gibt an, wie intensiv der Beschichtungswerkstoff mit dem Grundwerkstoff verbunden ist. Ist der Beschichtungswerkstoff zu wenig mit dem Grundwerkstoff verbunden, haftet er nur an der Oberfläche ohne dass eine metallurgische Verbindungszone vorhanden ist. Bei geringen Aufmischungen kann sich die Spur unter Belastung vom Grundwerkstoff ablösen. Ist die Beschichtung dagegen zu stark mit dem Grundwerkstoff verbunden, wirkt sich die hohe Vermischung von Grund- und Beschichtungswerkstoff negativ auf die metallographischen Eigenschaften der Spur aus. Die Spur verliert ihre geforderten Eigenschaften und wird anfällig für spannungsbedingte Risse in der Abkühlphase. Somit reicht es nicht, relative Abweichungen der Aufmischung während dem Prozess festzustellen, sondern eine absolute Messung der Aufmischung für jeden Zeitpunkt der Spurbeschichtung muss innerhalb eines Toleranzbereiches von +/-5% gewährleistet sein. Die Aufmischung ist nach der Literatur als Verhältnis zwischen der Spurquerschnittsfläche unterhalb der Bauteiloberfläche und der gesamten Spurquerschnittsfläche (siehe Bild 27) definiert:

$$\text{Aufmischung} = \frac{\text{Fläche unterhalb der Oberfläche}}{\text{gesamte Querschnittsfläche}} = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \quad (3.1)$$

Ähnlich wie beim Laserumschmelzen kommt es zu Oxidationserscheinungen auf der Oberfläche der Spurraupe und zu Porenbildung innerhalb der Spur, wenn keine Schutzgasatmosphäre über der Wechselwirkungszone ist. Diese Poren befinden sich vorwiegend in der Grenzschicht zwischen Grund- und Beschichtungswerkstoff, verursacht durch die Wasserstoffporenbildung bei Aluminium. Im Fall einer koaxialen Pulverdüse existieren zwei Wege um die nötige Schutzgasatmosphäre sicherzustellen. Zum einen wird das Pulver mittels einer Trägergasströmung aus Schutzgas in den Prozess eingebracht. Zum anderen wird noch zusätzlich Schutzgas zugeführt. Eine Überwachung der Schutzgasatmosphäre ist dennoch unabdingbar.

Das metallurgische Verbinden von zwei Werkstoffen birgt das Risiko von spannungsbedingten Rissen. Je nach Ursache entladen sich diese Risse schon während des Beschichtungsvorganges bzw. erst in der Abkühlphase. Liegen Risse vor ist nicht nur die gleichmäßige konstante Oberfläche geschwächt, sondern es entstehen erhebliche Angriffspunkte für thermo-mechanische Belastungen. Risse bis zur Größe von Haarrissen sind zu detektieren, auch wenn sie erst deutlich nach der Laserbearbeitung im Abkühlvorgang entstehen.

Eine vollständige Zusammenstellung aller zu überwachender Qualitätsgrößen beim Laserstrahlbeschichten ist in Bild 27 gegeben.

Merkmal	Prinzip	Fehlerauswirkung	Toleranz
Spurbreite		Spurbreite zu groß: Vorbearbeitungskontur wird deformiert Spurbreite zu gering: Oberfläche wird nicht vollständig beschichtet	+/- 0,2mm
Spurhöhe		Spurhöhe zu groß: Vorbearbeitungskontur wird deformiert Spurhöhe zu gering: geforderte Schichtdicke wird nicht erreicht	+/- 0,2mm
Aufmischung		Aufmischung zu groß: Materialeigenschaften der Spur werden verändert Aufmischung zu gering: Spur haftet ungenügend am Grundwerkstoff	+/- 5%
Spur-symmetrie		Spursymmetrie muss gegeben sein um eine konstante Schichtdicke mit homogenen Spurrändern zu gewährleisten	Kontur-abhängig
Oxidation		Reaktionen mit Luftsauerstoff führen zu nicht zulässigen Veränderungen der Werkstoffeigenschaften und zu Porenbildung	nicht zulässig
Risse		Beschichtungsspuren müssen rissfrei sein, da eine Schwächung in der Schicht zu Funktionsversagen und Bauteilausfall führen kann	nicht zulässig

Spurwelligkeit: wird durch Höhen- und Breitenkontrolle mit überwacht

Bearbeitungszeit: wird über Triggerpunkte und Systemuhr überwacht

Poren: können nur in nach geschalteter Offline-Prüfung zuverlässig erkannt werden

Lunker: Lunkerwahrscheinlichkeit ist beim eingesetzten Grundwerkstoff vernachlässigbar

Spritzer: sind immer vorhanden → keine Überwachung sondern Maskierung nötig

Bild 27: Zu überwachende Qualitätsmerkmale beim Laserstrahlbeschichten.

## **4 Analyse der Bearbeitungsergebnisse und der Prozessstrahlung**

Ein Laserstrahl, der auf einen Werkstoff trifft, bewirkt dort mit oder ohne Zusatzwerkstoff eine lokale, metallurgische Veränderung und verursacht Prozessemissionen unterschiedlicher Wellenlängen und Intensitäten. Die Kenntnis von Korrelationen zwischen der Art und Intensität einer Veränderung auf dem Bauteil und einer charakterisierbaren Änderung in den Prozessemissionen ist der Grundstein einer Online-Prozessüberwachung. Im Folgenden werden eindeutige Merkmale innerhalb der Prozessstrahlung vorgestellt, die auf Zustände von Qualitätsgrößen schließen lassen. Solche so genannten Indikatoren werden auf ihre Messschärfe, Zuverlässigkeit und Unabhängigkeit von Prozessparametern getestet. Die Unabhängigkeit der Indikatoren von den Prozessparametern ist wichtig, weil ein Qualitätssicherungssystem die Bauteilqualität und nicht den Zustand der Anlage sicherstellen soll. Da zwischen Prozessparametern und Ergebnisqualität oft ein direkter Zusammenhang besteht, gibt es in diesem Bereich natürliche Überschneidungen aber auch Situationen, an denen ein Ergebnisfehler erkannt wird, dessen Ursache auf verschiedene Parameter zurückzuführen ist. Die Qualitätssicherung versucht hier immer in einem zweiten Prüfschritt die richtige Ursache zu ermitteln und dem Anlagenbediener eine Hilfestellung zur schnelleren Problemlösung zu geben.

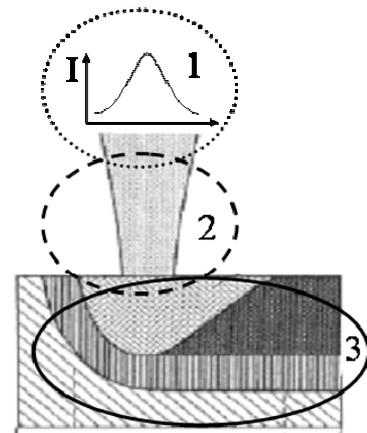
### **4.1 Analyse des Umschmelzvorganges**

Die beim Laserstrahlumschmelzen auftretenden Emissionen können in ihrer Eigenschaft klassifiziert und zu Effekten im Grundwerkstoff zugeordnet werden. Diese Zuordnung wird im Folgenden anhand der Indikatoren prinzipiell dargestellt und mittels durchgeführter Versuchsumfänge auf ihre Eignung getestet.

### 4.1.1 Modell zum Laserstrahlumschmelzen

Eine Photonenquelle gibt Laserstrahlung ab, die durch ein optisches System zum Werkstück transportiert wird. Von der Oberfläche des Werkstückes wird die Laserstrahlung zum einen Teil absorbiert und zum anderen reflektiert. Die absorbierte Strahlung wird in Wärme gewandelt, welche die Wechselwirkungszone bis zum Phasenwechsel in den flüssigen Aggregatzustand erwärmt und damit eine umgeschmolzene Spur erzeugt. Detailliert betrachtet lässt sich Laserstrahlumschmelzen in drei Bereiche untergliedern:

1. Intensitätsverteilung und Strahlformung
2. Absorption und Energiebilanz
3. Wechselwirkungseffekte und Prozessauswirkung



#### 4.1.1.1 Intensitätsverteilung und Strahlformung

In Kapitel 3.2.1 wurden die beiden Laser mit gaußähnlicher Intensitätsverteilung beschrieben, die im Wesentlichen bei den Untersuchungen dieser Arbeit eingesetzt worden sind. Eine gaußförmige Intensitätsverteilung bleibt nach [1] mit der Strahl- ausbreitung erhalten (siehe Bild 28).

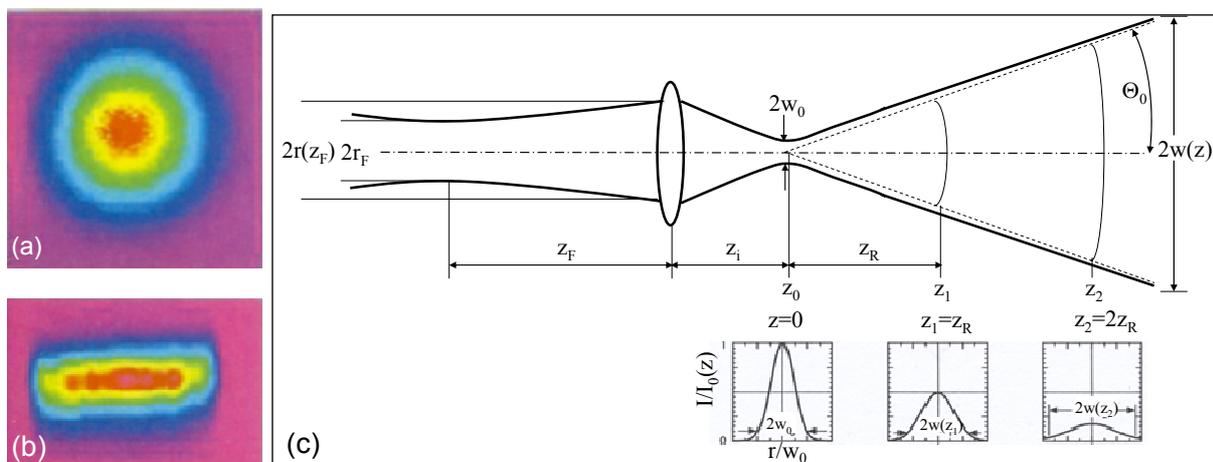


Bild 28: (a) Intensitätsverteilung des Rofin Lasers und (b) des Laserline Diodenlasers nach Strahlvermessung durch den FocusMonitor (Primes) sowie (c) die Strahl- ausbreitung mit Erhalt der gaußähnlichen Intensitätsverteilung.

Die Intensitätsverteilung der Strahlquelle ist ansatzweise auch in den Prozess-emissionen beim Aufheizprozess der Werkstückoberfläche erkennbar. Die Kamera-sequenzen aus Bild 29 zeigen wie unmittelbar nach dem Einschalten des Lasers der graphitierte Aluminiumgrundwerkstoff von der Spotmitte bzw. von der Linie der maximalen Intensität beim Diodenlaser beginnend erhitzt wird. Dieser Effekt wird in [6] in ähnlicher Art beschrieben, indem ein Anschmelzen von der Spotmitte beginnend oberhalb eines Schwellenwertes der Laserleistung beobachtet wird.

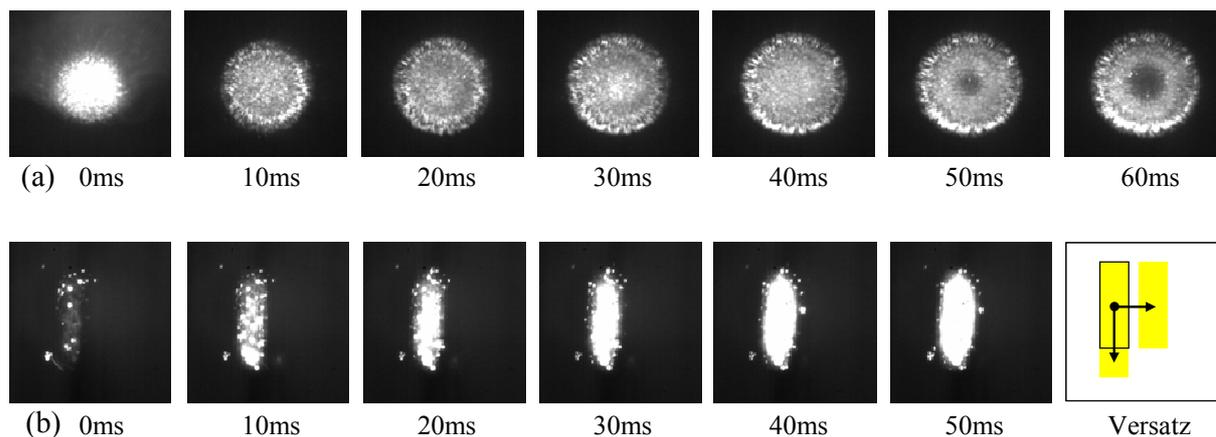


Bild 29: Emissionen der Wechselwirkungszone verursacht durch das Strahlprofil (a) des Rofin-Sinar-Lasers und (b) des Laserline Diodenlasers erkennbar am Aufheizen des Coating unmittelbar nach Einschalten des Lasers. Skizze (b rechts) zeigt umrandet die Ist-Justage der zwei Laserspots des Diodenlasers und mit den Pfeilen angedeutet die Versatzmöglichkeiten.

Die Intensitätsverteilung und die Strahlform haben Einfluss auf die Spurgeometrie. Ein rechteckiger Spot bewirkt einen anderen Isothermenverlauf und eine andere Umschmelzgeometrie als ein kreisförmiger Laserstrahl. Bild 30 zeigt die Schmelzbadtemperatur und den Isothermenverlauf nach [11] in Verbindung mit typischen Umschmelzgeometrien dieser Arbeit. Sowohl die Isothermen als auch Schliffpräparationen zeigen eine deutliche Verbindung zwischen Intensitätsverteilung der Strahlquelle und der Auswirkung auf die Wärmeverteilung und die umgeschmolzene Spur.

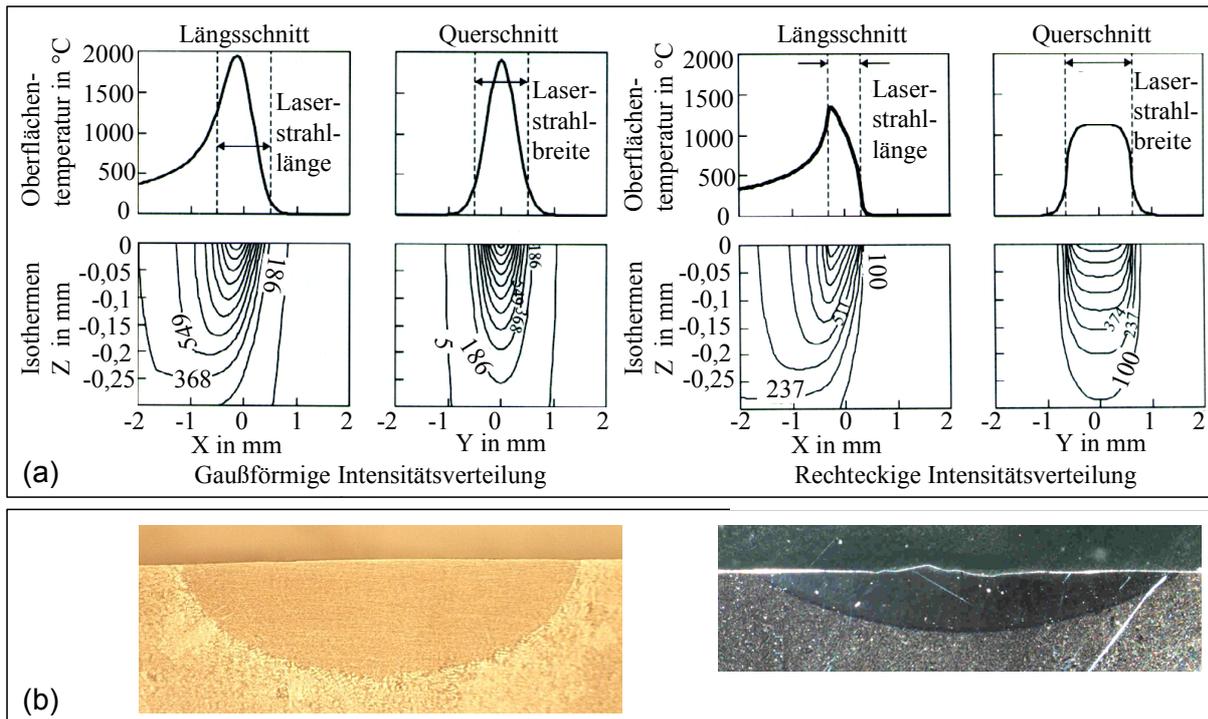


Bild 30: (a) Verlauf der Isotherme für kreisförmige Gaußverteilung (links) und rechteckigen Laserspot (rechts) nach [11] in Korrelation zu (b) Querschliffen dieser Arbeit mit ähnlichen Strahlprofilen.

#### 4.1.1.2 Absorption und Energiebilanz

Betrachtet man Gl.2.4 erschließt sich, dass ein gewisser Anteil der Laserleistung werkstoff- und oberflächenabhängig absorbiert wird. Eine Momentaufnahme der Wechselwirkungszone während des Umschmelzprozesses zeigt, dass sich die Wechselwirkungszone beim Umschmelzen von Aluminium mit einem Graphitcoating grob in zwei Teile mit verschiedenen Absorptionsgraden aufteilen lässt. Im vorderen Teil, der im Fall einer kreisförmigen Strahlquelle die Form einer Sichel hat, werden die Photonen zunächst von der Graphitschicht absorbiert. In Richtung Nachlauf, im Anschluss an die Sichel, trifft die Laserstrahlung auf ein offenes bzw. noch mit verändertem Restcoating bedecktes flüssiges Schmelzbad. Dieses kühlt nach dem Verlassen der Wechselwirkungszone ab und erstarrt. Bild 31 und Gl.4.1 zeigen, dass die absorbierte Laserstrahlung  $P_A$  direkt mit einem durchschnittlichen Absorptionsgrad über die gesamte Wechselwirkungszone zusammenhängt, der sich aus zwei Teilen zusammensetzt. Zum einen  $P_{AS}$ , die absorbierte Laserleistung in der Sichel und zum anderen die absorbierte Laserleistung im Schmelzbad  $P_{AB}$ . Weitere temperaturabhängige Inhomogenitäten innerhalb eines Bereiches, wie in Kapitel 2.1.1 be-

schrieben, werden im Folgenden vernachlässigt. Ebenso wird ins Schmelzbad hineintreibendes Restcoating, wie das Herz in Bild 31, nicht gesondert ausgewertet.

$$P = P_A + P_R + P_{T \rightarrow 0} \quad (2.4)$$

$$P_A = P_{AS} + P_{AB} \quad (4.1)$$

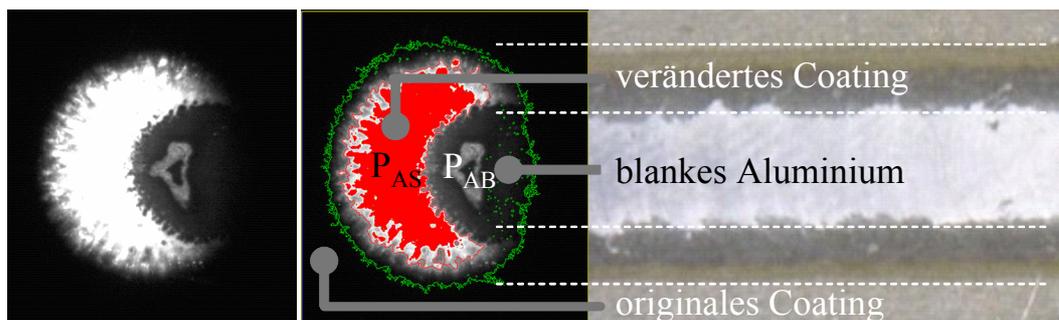


Bild 31: (links) Momentaufnahme beim Umschmelzen mit zweigeteilter Wechselwirkungszone. Der Sichelbereich und das nachfolgende Schmelzbad unter Vernachlässigung vereinzelter Coatingreste. (rechts) Markierung der beiden Bereiche durch die Bildverarbeitung und Auswirkung des Umschmelzvorgangs auf den Coatingzustand nach dem Prozess.

Eine Betrachtung der Emissionskoeffizienten und –grade von Graphitcoating, von flüssigem und erstarrtem Aluminium gibt Rückschlüsse auf die Absorptionsvorgänge in der Wechselwirkungszone. Damit sind Folgerungen auf Prozesseffizienz, Optimierungspotential und Interpretationsgrundlagen der Prozessemissionen für die Prozessdiagnose gegeben. Eine Ergänzung von Bild 5 aus Kapitel 2.1.1.1 durch Thermographieanalysen des eingesetzten Coating, blankem Aluminium, oxidiertem Aluminium und einer umgeschmolzenen Spur in einem Messbereich bis 300°C gibt Aufschluss auf den Emissionsgrad der jeweiligen Oberfläche. Bild 32 zeigt als höchsten Graph den Emissionskoeffizienten des schwarzen Kalibriersprays auf dem Aluminiumkörper, der einem Schwarzen Strahler entspricht. Durch ein taktiles Thermometer im Aluminiumgrundwerkstoff konnte die Kalibrierung durch die bekannten Emissionskoeffizienten des Schwarzen Strahlers überprüft werden. Der nächst beste Emissionsgrad aus Bild 32 ist der des eingesetzten Graphitcoatings. Dieser hohe Emissionsgrad ist der Grund für die helle Sichel im Kamerabild und die Bestätigung für das Bestreben nach [8] das Coating in der Wechselwirkungszone möglichst lange zu erhalten bevor es durch die Laserstrahlung zerstört wird (siehe Bild 12). Die drei darunter liegenden Kurven resultieren aus unterschiedlich stark und

unterschiedlich lang bestrahltem Graphitcoating und einer oxidierten Spur, auf die im Kapitel 4.1.5 eingegangen wird. Die unterste Kurve, für blankes Aluminium, zeigt die schwachen Emissionen des unbehandelten Grundwerkstoffes.

Beim Umschmelzprozess liegt im hinteren Teil der Wechselwirkungszone, im Übergangsbereich von flüssigem Schmelzbad zu erstarrter Umschmelzspur, eine vergleichbare Temperatur vor. Wie Bild 31 zeigt ist das flüssige Schmelzbad dennoch durch den Sprung im Emissionskoeffizienten von der soliden Umgebung unterscheidbar.

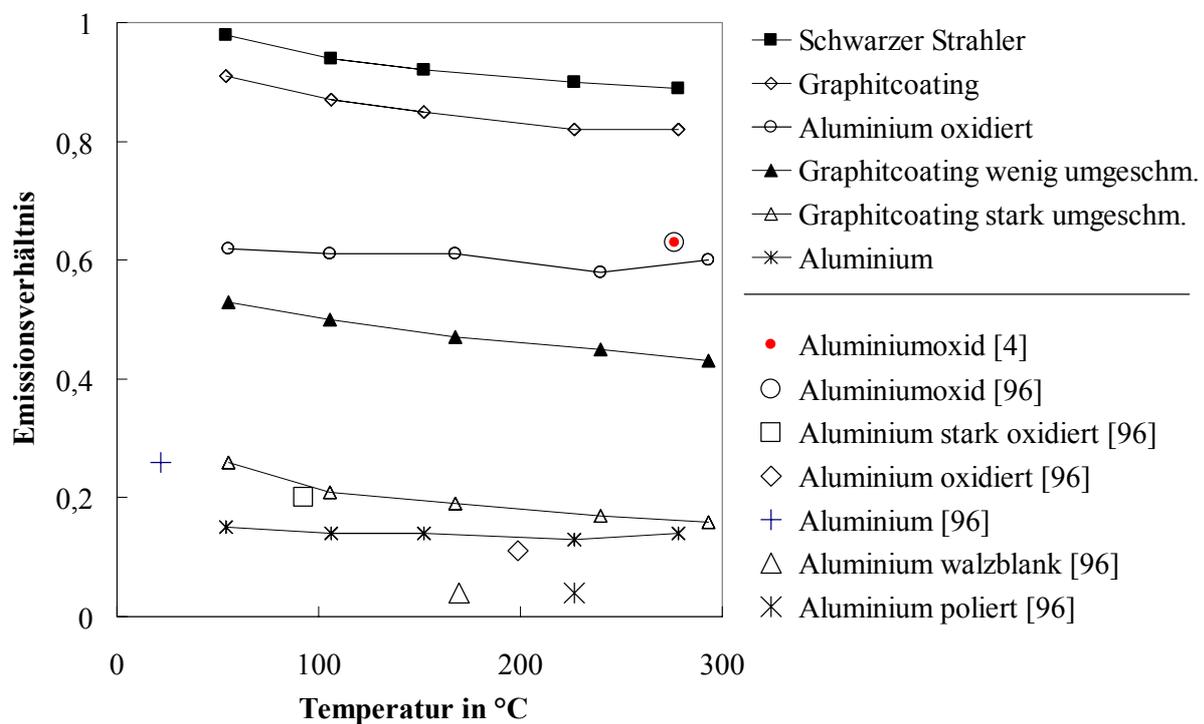


Bild 32: Emissionsgrad verschiedener Oberflächen ermittelt durch Thermographieanalysen im Vergleich zu Werten aus der Literatur.

Die durch die Sichel- und Schmelzbadfläche absorbierte Laserstrahlung führt zum Umschmelzen der Spur und zu unerwünschten Verlusten.

Um Größenordnungen der genutzten und verlorenen Laserstrahlung abschätzen zu können, wird im Folgenden eine grobe Energiebilanz mit wenigen Annahmen und Vereinfachungen aufgestellt. Die eingekoppelte Laserstrahlung setzt sich aus den Absorptionsgraden und den dazugehörigen Flächenanteilen in der Wechselwirkungszone zusammen. Durch Kamerabilder von der Wechselwirkungszone und

eine Graustufengradientenanalyse der Bilder kann die Fläche der Sichel und des Schmelzbades ermittelt werden. Die zugehörige Absorptionsfähigkeit ist durch die Thermographieanalyse aus Bild 32 bekannt. Für die Sichelfläche wird ein Emissionsgrad  $\varepsilon_{AS}=0,82$  für Graphit bei  $280^\circ\text{C}$  und für das Schmelzbad  $\varepsilon_{AB}=0,16$  für das Restcoating der umgeschmolzene Spur bei  $290^\circ\text{C}$  angenommen. Um eine Abschätzung der absorbierten Strahlung zu erhalten, werden beispielhaft die beiden Einzelflächen aus Bild 31 mit zugehörigem Emissionsgrad zu einem gemittelten Emissionsgrad der Wechselwirkungszone  $\varepsilon_A$  verrechnet.

$$P_A = P_{AS} + P_{AB} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_A = \varepsilon_{AS} \cdot (\text{Flächenanteil Sichel}) + \varepsilon_{AB} \cdot (\text{Flächenanteil Schmelzbad}) \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_A = 0,82 \cdot (0,37) + 0,16 \cdot (0,63) \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_A \approx 0,40 \quad (4.5)$$

Der Anteil der in der Wechselwirkungszone absorbierten Strahlung ist damit ungefähr 40% und kann mit dem Wirkungsgrad der Energiebilanz aus Tabelle 5 verglichen werden.

Über Photon-Elektron-Wechselwirkungen wird die Laserstrahlung innerhalb der optischen Eindringtiefe absorbiert und in Wärme umgewandelt. Ausführliche Gleichungen zur Berechnung der absorbierten Wärmemenge und Brennflecktemperatur in Abhängigkeit von Laserleistung, Bestrahlzeit und diversen Stoffkonstanten sind in [1] für stehende und bewegte punkt-, linien- und gaußförmige Strahlquellen zu finden.

Der so eingekoppelte Anteil der Laserstrahlung wird in Wärme  $Q_A$  gewandelt und liegt im Umschmelzprozess vor als

$$Q_A = Q_U + Q_L + Q_K + Q_E + Q_C \quad (4.6)$$

$Q_u$  ist die Wärmemenge, die das **Umschmelzergebnis** bewirkt, sie setzt sich aus drei Teilmengen zusammen.

$$Q_U = Q_{U,u_m} + Q_{U,H} + Q_{U,m_{WWZ}} \quad (4.7)$$

1.  $Q_{U,u_m}$ , die Energie zur Erwärmung der Spurmasse von Umgebungs- auf Schmelztemperatur

$$Q_{U,u_m} = c_p \cdot m \cdot (T_m - T_u) \quad (4.8)$$

2.  $Q_{U,H}$ , die Schmelzenthalpie für den Wechsel des Aggregatzustandes

$$Q_{U,H} = m_{mol} \cdot \Delta H_m \quad (4.9)$$

3.  $Q_{U,m_{WWZ}}$ , die Energie zum Erwärmen der Spurmasse von Schmelztemperatur auf maximale Wechselwirkungszonentemperatur

$$Q_{U,m_{WWZ}} = c_p \cdot m \cdot (T_{WWZ} - T_m) \quad (4.10)$$

Von den Verlustenergien ist die durch **Wärmeleitung** in das Werkstück geleitete Energie  $Q_L$  die maßgebliche. Die überdurchschnittlich gute Wärmeleitung von Aluminium sorgt dafür, dass die Wärme schnell im Werkstück verteilt wird. Folgen sind unerwünschte Bauteilerwärmung und ein geringerer Wärmestau im Vergleich zu Eisen. Die Verlustenergie durch Wärmeleitung kann unter der Annahme eines eindimensionalen, stationären Zustandes durch

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.13)$$

berechnet werden.

Eine weitere Verlustenergie ist die Wärmeabfuhr durch **Konvektion**  $Q_K$ . Durch die vorhandene Schutzgasströmung, die bei ihrem Kontakt mit der Wechselwirkungszone dieser Wärme entzieht, handelt es sich um erzwungene Konvektion. Der Wärmestrom kann über Gl.4.11 berechnet werden. Die dafür nötige Wärmeübergangszahl  $\alpha$  wird über die umgestellte Gl.2.17 mit der Nußeltzahl bestimmt. Diese wird abhängig von der Strömungsart nach Gl.2.19 für laminare Strömungen, nach Gl.2.20 für turbulente Strömungen und nach Gl.2.22 für den Übergangsbereich ermittelt.

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot A \cdot (T_F - T_W) = \frac{Nu_L \cdot \lambda}{L} \cdot A \cdot (T_F - T_W) \quad (4.11)$$

$$Nu_L = \frac{L}{\delta_T} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2.17)$$

$$Nu_{L,lam} = 0,644 \cdot \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{Re_L} \quad \text{für } Re_L < 10^5 \quad (2.19)$$

$$Nu_{L,turb} = \frac{0,037 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_L^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot f_3 \quad \text{für } 5 \cdot 10^5 < Re_L < 10^7 \quad (2.20)$$

$$Nu_L = \sqrt{Nu_{L,lam}^2 + Nu_{L,turb}^2} \quad \text{für } 10 < Re_L < 10^7 \quad (2.22)$$

Als Verlustenergie mit geringem Einfluss auf die Wärmebilanz aber mit entscheidendem Einfluss auf die Online-Prozessdiagnose ist die **Wärmestrahlung**  $Q_E$  zu nennen. Die durch Wärme entstehende Strahlung wird von Sensoren empfangen und zu Messsignalen verarbeitet. Der Energieaufwand für die Wechselwirkungszone wird näherungsweise nach Gl.4.12 berechnet.

$$\dot{q}_E = \varepsilon \cdot C_S \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (4.12)$$

$Q_C$  ist die Energie welche die **Coatingschicht** innerhalb der Sichelfläche aufnimmt, bevor sie in der Schmelzbadfläche nahezu nicht mehr vorhanden ist. Aufgebracht werden muss dabei ebenfalls die Energie nach Gl.4.8, Gl.4.9 und Gl.4.10 mit werkstoffabhängigen Eigenschaften und der vernachlässigbaren Masse des Coatings. Für die temperaturbedingte Veränderung bis hin zur Zerstörung des Coatings in der Wechselwirkungszone muss die Schmelzenthalpie durch die Sublimationsenthalpie ersetzt oder durch die Verdampfungsenthalpie ergänzt werden.

Zur Charakterisierung der Wärmemengen bei einem Standardprozess werden oben genannte Berechnungsgrundlagen mit Informationen aus dem Umschmelzprozess und einer abgeschätzten Schmelzbadtemperatur kombiniert. Die in Tabelle 4 aufgeführten Stoff- und Prozessdaten wurden eingesetzt.

Bezeichnung	Einheit	Wert	Quelle
<b>Prozessdaten</b>			
Laserleistung	W	6000	
Vorschub	m/s	0,025	
Bearbeitungszeit	s	3	
Laserstrahlfläche	m <sup>2</sup>	0,00007552	
Schutzgasmenge (Argon)	m <sup>3</sup> /s	0,0001	
Spurlänge	m	0,075	
Umschmelzbreite (nach Querschleif)	mm	13,35	
Umschmelztiefe (nach Querschleif)	mm	2,37	
Spurvolumen	mm <sup>3</sup>	1621,17	
Umgebungstemperatur (Annahme)	K	293	
Brennflecktemperatur (Annahme)	K	1473	
<b>Stoffdaten: Grundwerkstoff (Aluminium)</b>			
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,702	[85]
Molmasse	g/mol	26,98	[86]
spez. Wärmekapazität	kJ/kg*K	0,9	[87]
Schmelzenthalpie	kJ/mol	10,70	[88]
Schmelzenthalpie	kJ/kg	404	[85]
Schmelztemperatur	K	933	[86]
Siedetemperatur	K	2723	[86]
Oberflächenspannung (660°C)	N/cm	0,00868	[87]
Wärmeleitfähigkeit (273,15K)	W/mK	236	[4]
Dicke des Werkstoffes	m	0,04	
Strahlungskonstante (schwarzer Strahler)	W/m <sup>2</sup> *K <sup>4</sup>	5,67	
Emissionsverhältnis		0,4	
<b>Stoffdaten: Schutzgas (Argon)</b>			
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	1,66	[89]
dynamische Viskosität (298,15K)	N*s/m <sup>2</sup>	0,0000226	[4]
kinematische Viskosität (Schutzgas)	m <sup>2</sup> /s	1,36145E-05	
Temperaturleitfähigkeit (305,15K)	W/mK	0,027	[90]
Strömungsgeschwindigkeit (berechnet)	m/s	1	
Wärmeleitfähigkeit (300K)	W/(m*K)	0,0177	[89]
Reynoldszahl (berechnet)		346,6902655	
Prandtlzahl (Näherung für Gas)		0,72	[96]

Tabelle 4: Prozess- und Stoffdaten zur Abschätzung der Energiebilanz.

In Tabelle 5 wurde mit Werten aus Tabelle 4 und Gl.4.6 die Nutz- und Verlustenergien für einen Standardprozess berechnet.

	Wärmestrom W/Strahlfläche	Wärme J	Wärmeanteil %
<b>Laserenergie</b>	<b>6000</b>	<b>18000</b>	<b>100</b>
<b>Wärme für Umschmelzergebnis (Phasenwechsel Aluminium)</b>		<b>6389,22</b>	<b>35,50</b>
<b>Verlust durch Wärmeleitung</b>	<b>525,77</b>	<b>1577,31</b>	<b>8,76</b>
Verlust durch Konvektion (laminar)	3,70	11,11	0,06
Verlust durch Konvektion (turbulent)	1,31	3,93	0,02
<b>Verlust durch Konvektion (Übergang)</b>	<b>3,93</b>	<b>11,78</b>	<b>0,07</b>
<b>Verlust durch Strahlung</b>	<b>8,07</b>	<b>24,20</b>	<b>0,13</b>
<b>Absorbierte Energie <math>Q_A</math></b>		<b>8002,51</b>	<b>44,46</b>

Tabelle 5: Energiebilanz für einen Standardumschmelzprozess dieser Arbeit.

#### 4.1.1.3 Wechselwirkungszoneneffekte und Prozessauswirkungen

Der auffälligste Sachverhalt der Wechselwirkungszone ist deren Aufteilung in die Sichel- und Schmelzbadfläche. Der Einsatz verschiedener Laser verleiht dieser Aufteilung jeweils ein charakteristisches Emissionsbild sowie Prozessergebnis. Ein rechteckiger Laserspot, z.B. eines Diodenlasers, bewirkt über die gesamte Spotbreite in Vorschubrichtung eine konstante Bestrahlzeit durch den Laser (siehe Bild 33a I). Einzig der Abfall der Strahlintensität an den Spoträndern und Wärmeleitungseffekte wirken sich davon abweichend auf die Oberflächenbeschaffenheit, Spurgeometrie und das Emissionsbild aus. Das im Vorfeld aufgetragene Coating wird durch die Einwirkung der Laserstrahlung beeinflusst. Bild 33a II zeigt das aufgetragene Coating, eine Übergangszone sowie das von der maximalen Strahlungsintensität veränderte Coating. Die umgeschmolzene Spur hat aufgrund der Spotgeometrie ein Verhältnis von Spurtiefe zu Spurbreite von ca. 1/6 (siehe Bild 33a III). Als Emissionsbild einer CMOS-Kamera erhält man eine in die Breite gezogene helle Sichel vor einem Schmelzbad, das noch vollständig mit einer veränderten Coatingschicht bedeckt ist (siehe Bild 33a IV). Wäre das Schmelzbad offen und nicht mehr mit der veränderten Coatingschicht bedeckt wäre es dunkler und es würden vereinzelt Schollen aus Restcoating zu sehen sein. Die beiden Sichelkrümmungen an den Enden der geraden hellen Front, finden ihre Ursache in der abfallenden Strahlungsintensität, wodurch der ursprüngliche Coatingcharakter immer mehr erhalten bleibt.

Bei Umschmelzprozessen mit einer gaußähnlichen Intensitätsverteilung einer kreisförmigen Strahlquelle addieren sich mehrere Einflüsse, die zur Sichelform führen. Zum einen erzeugt der kreisförmige Spot eine kreisförmige Front der Wechselwirkungszone mit einem Intensitätsmaximum im Mittelpunkt. Zum anderen ist die Bestrahlzeit durch den kreisförmigen Laserspot ebenfalls im Mittelpunkt am höchsten. Die in Bild 33b I dargestellten Kurven bewirken ein Intensitätsmaximum gekoppelt mit einem Maximum der Bestrahlzeit in der Spurmitte. Die Überlagerung der beiden Maxima wirkt sich auf die verbleibende Coatingschicht und das Umschmelzergebnis aus. Bild 33b II zeigt die Oberfläche einer Spur, die mit einer gleichmäßig ansteigenden Leistungsrampe bei konstantem Strahldurchmesser umgeschmolzen wurde. Die Oberfläche wurde nach dem Prozess leicht abgebürstet um das Ergebnis darstellen zu können.

0-15%: Energiedichte ist so gering, dass nahezu kein Effekt im CMOS-Bild und auf der Oberfläche erkennbar ist. (1)

15-30%: Energiedichte ist so hoch, dass das Coating verändert wurde und sich durch Bürsten ablöst. Da ein konstanter Strahldurchmesser und Vorschub gegeben ist, zeigt der zentral beginnende und breiter werdende blanke Bereich die Auswirkung der gaußähnlichen Intensitätsverteilung und der zur Spurmitte ansteigenden Bestrahlzeit. (2)

30-60%: Energiedichte und Bestrahlzeit mit dem zentralen Maximum steigen so weit an, dass das Coating weiter verändert wird, bis es auf dem Grundwerkstoff anhaftet. Das Coating löst sich in diesem Bereich durch Bürsten nicht mehr ab. CMOS-Bilder zeigen den Übergang von einer runden zu einer sichel-förmigen Geometrie. (3, 4)

60-90%: Energiedichte am zentralen Maximum bewirkt vollständiges Entfernen des Coatings. Die Oberfläche zeigt im Mittelbereich den Aluminiumgrundwerkstoff. Im CMOS-Bild ist ein dunkler Bereich in der Schmelzbadmitte erkennbar, der seine Ursache im Emissionskoeffizienten des flüssigen Aluminiums findet. (5)

Entsprechend der kreisförmigen Wärmequelle ist auch das Tiefen-Breiten Verhältnis der umgeschmolzenen Spur mit 1 zu 3 doppelt so groß wie beim rechteckigen Laserspot (siehe Bild 33b III).

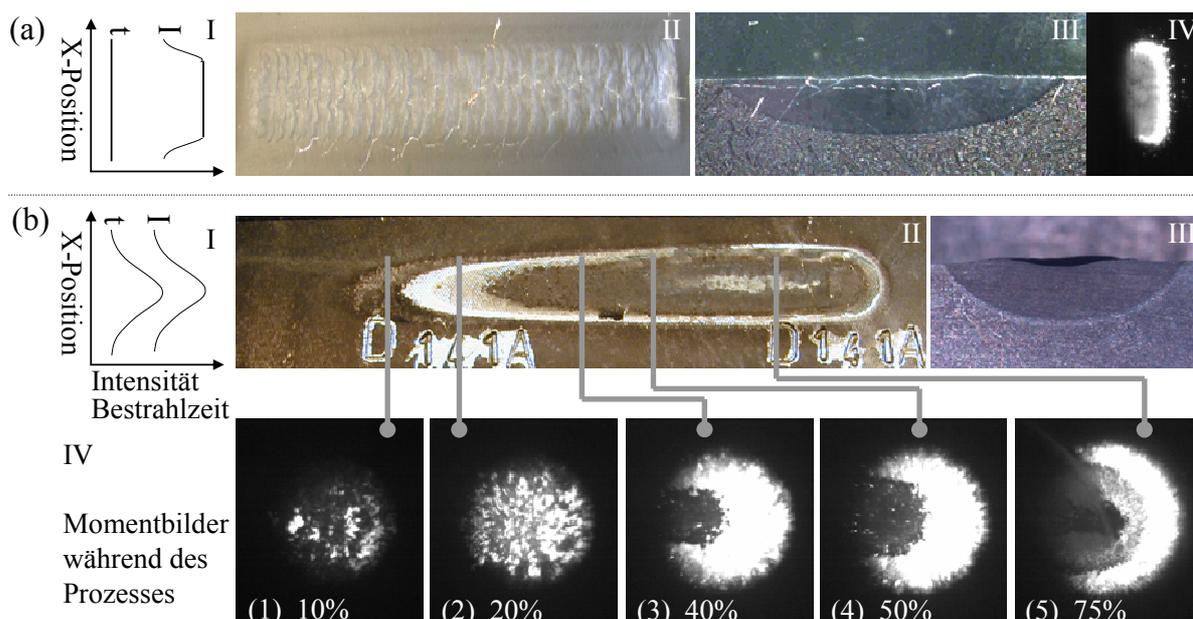


Bild 33: Vergleich von Umschmelzprozessen mit (a) rechteckigem Laserspot und (b) kreisförmigem Laserspot anhand (II) der Spuroberfläche nach dem Umschmelzen, (III) dem Querschliff und (IV) den Prozessemissionen.

Bei Umschmelzvorgängen kann es zu werkstoffabhängigen Schmelzbadströmungen kommen. Diese Schmelzbadströmungen sorgen für einen Temperaturausgleich innerhalb des Schmelzbades und damit je nach Strömungsrichtung für die Ausbildung einer breiten, flachen oder schmalen, tiefen Spur. Das Coating kann, ebenfalls von der Marangoni-Strömung beeinflusst, in der Wechselwirkungszone aufbrechen und in das Schmelzbad eintauchen [10], [6]. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten AlSi10Mg Grundwerkstoff deutet sowohl die Schlifffauswertung als auch die Prozessdiagnose darauf hin, dass nur eine sehr geringe bis keine Schmelzbadströmung existiert. Die Spurgrenzen zum Grundwerkstoff verlaufen kreissegmentartig ohne die strömungsbedingten Deformationen aus Bild 7. Einzig die unruhige Schmelzbadoberfläche ist ein Indiz für eine Schmelzbadströmung, wobei hier die Ursache in der Schutzgasströmung angenommen wird. Auch die Online-Prozessbilder die ein Unterspülen des Coatings durch die Schmelzbadströmung zeigen müssten deuten darauf hin, dass keine Schmelzbadströmung vorliegt. Bild 34 zeigt bei 0ms den relativen Startpunkt dieser kurzen Bildsequenz eines Umschmelzprozesses. Hier ist eine Coatingscholle, die aufgrund der Prozessparameter innerhalb der Sichel nicht vollständig verändert wurde zu sehen. Sie ist nun im offenen Schmelzbad der immer stärker werdenden Energiedichte ausgesetzt. Bild 34 bei 20ms zeigt, wie die Scholle durch die Laserstrahlung verändert wird bis sie nach 40ms zum Teil und nach 80ms vollständig

verschwunden ist. Zurück bleibt ein dunkler Fleck, der von einer möglichen Schmelzbadströmung unbeirrt nach 140ms die Wechselwirkungszone verlässt.

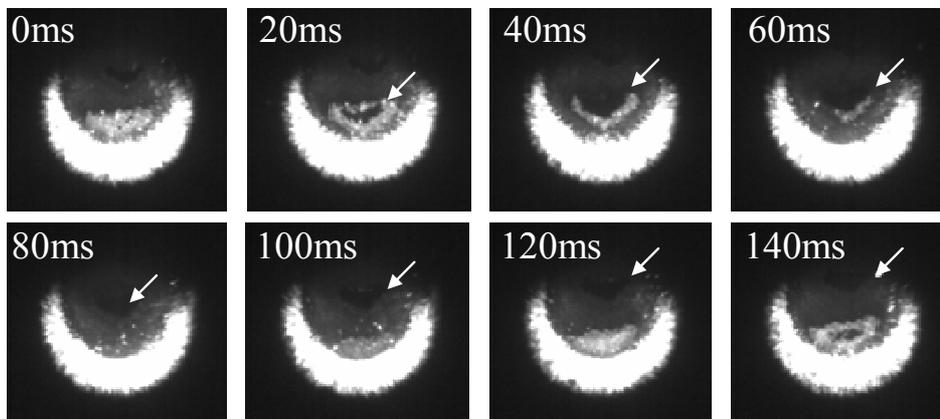


Bild 34: Bildsequenz der Prozessüberwachungskamera zeigt das Aufreißen des Coatings. Die Coatingöffnung bleibt bis zum Verlassen der Wechselwirkungszone erhalten.

Aus Bild 33 und Bild 34 lassen sich folgende Theorien ableiten:

- Das Coating wird nicht von einer Schmelzbadströmung in die Spur gespült.
- Das Coating wird ab einer bestimmten Energiedichte in Kombination mit einer entsprechenden Bestrahlzeit so stark verändert (verdampft, sublimiert oder chemisch verändert), dass es nur noch schwach emittiert, auf dem Grundwerkstoff schwimmt und nach dem Erstarren mit dem Grundwerkstoff so intensiv verbunden ist, dass es nicht mehr abgebürstet werden kann. Der hohe Sublimationspunkt von Graphit bei 3800°C macht das Sublimieren als ersten Schritt der Veränderung unwahrscheinlich. Eine chemische Veränderung des Coatings oder der Coatingzusammensetzung durch die restlichen Bestandteile im Coatingwerkstoff wie Harze und Lösemittel ist nahe liegender. Der Anteil dieser Bestandteile liegt nach einer Thermogravimetrieuntersuchung bei ca. 40% und sowohl die Zeitpunkte als auch Temperaturen, an denen die Harze und Lösemittel eine Veränderung in der Thermogravimetrieanalyse verursachen, liegen unterhalb der des Graphitanteils.
- Erst in einem zweiten Schritt scheint das Coating beim Überschreiten einer Energiedichte, ohne Einwirken einer Schmelzbadströmung nahezu vollständig entfernt zu werden. Es bleibt in diesem Bereich ein offenes aus Grundwerkstoff bestehendes Schmelzbad übrig, das im Kamerabild dunkel und in der erstarrten Spur aluminiumfarben erscheint.

### 4.1.2 Bewertung der Umschmelzbreite

Unter Umschmelzbreite versteht man die maximale Ausdehnung der umgeschmolzenen Spur orthogonal zur Vorschubrichtung. Wenn die Wärme homogen abfließen kann, also kein Hohlraum oder ähnliches einen Wärmestau verursacht, ist die maximale Breite aufgrund der laserinduzierten Oberflächenwärmequelle an der Werkstückoberfläche. Mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche nimmt die Breite ab und die umgeschmolzene Spur hat im Querschliff die Form eines Kreissegmentes. Zusätzlich zu den Prozessparametern nimmt das Wärmeleitungsvermögen des Werkstoffes und eine mögliche Marangoni-Strömung Einfluss auf die Umschmelzbreite. Eine geeignete Orientierung der Marangoni-Strömung treibt die heiße Schmelzbadströmung an die Schmelzbadränder um dort weiteres Material aufzuschmelzen. Horizontale Wärmeleitung erklärt, dass die Umschmelzbreite bei geringen Vorschüben größer als der Strahldurchmesser und die an der Oberfläche sichtbare Coatingbeschädigung sein kann.

Bild 35 zeigt am Beispiel eines zweiteiligen Laserspots, der im Mittelbereich durch Überlappung die doppelte Energiedichte aufweist, dass auch in den Randbereichen ohne sichtbare Beschädigung des Coatings umgeschmolzen wurde. Die Prozessmissionen der originalen (Bild 35c) und ausgewerteten Momentaufnahme (Bild 35d) zeigen, dass die doppelte Energiedichte in der Sichel- und Schmelzbadintensität erkennbar ist. Bild 35c zeigt ebenfalls, dass die zum Umschmelzen nötige Schmelztemperatur im CMOS-Bild auswertbar ist. Vorteilhaft für die Unterscheidung des flüssigen Schmelzbades vom gerade erstarrtem Grundwerkstoff ist der höhere Emissionsgrad von flüssigem Aluminium im Gegensatz zu festem bei Schmelztemperatur. Der Indikator für die Umschmelzbreite erkennt die Isotherme der Schmelztemperatur des Grundwerkstoffes und vermisst diese hinsichtlich der Breite. In der vorliegenden Bildanalyse wird die Isotherme durch einen Graustufenschwellenwert und eine gradientenbasierende Objekterkennung (Blob = **b**inary **l**arge **o**bject) erkannt und im Momentbild durch die äußere Geometrie markiert. Anschließend wird die Geometrie in ihrer Dimension vermessen. Über den in Bild 35b dargestellten Maßstab kann die Breite quer zur Vorschubrichtung von Pixel in Millimeter umgerechnet werden.

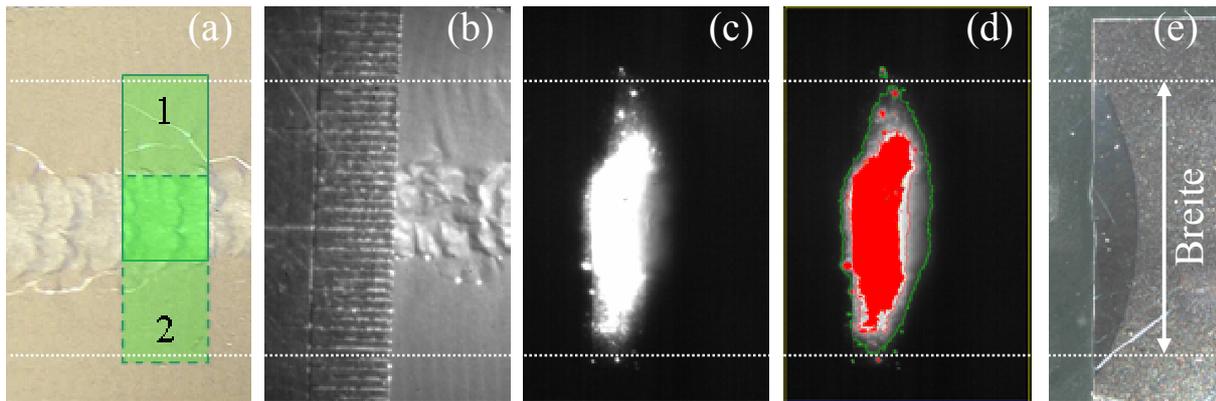


Bild 35: (a) Fotografie der Oberfläche, (b) Maßstab (0,5mm/Skalenteil) durch Momentaufnahme der Überwachungskamera nach dem Umschmelzen, (c) Momentaufnahme und (d) ausgewertete Momentaufnahme während dem Umschmelzprozess. (e) Querschliff des Prozessergebnisses eines Standardprozesses mit dem Diodenlaser bei  $P=6\text{kW}$ ,  $v=1,5\text{m/s}$ , einem Gasstrom von 360l/h und einer gesamten Spotbreite von 16mm mit einer Spotüberlappung von 4mm.

Da die umgeschmolzene Spur von einer Oberflächenwärmequelle erzeugt wird, ist der Strahldurchmesser als dominierende Einflussgröße für die Umschmelzbreite einleuchtend. Einen Beleg dafür findet man in [8] und Bild 36a, einem Pareto-diagramm der Wechselwirkung von Prozessparametern und Umschmelzbreite auf Basis der in [8] durchgeführten Versuche. Das Pareto-diagramm zeigt, von oben nach unten, die an Einfluss abnehmenden Prozessparameter. Gleichartige Buchstabenkombinationen stehen für den quadratischen Einfluss der Prozessgröße, während zwei verschiedene Buchstaben die Wechselwirkungen der beiden Prozessgrößen symbolisieren. Weiterhin besagt das Pareto-diagramm als Ergebnis einer statistischen Versuchsauswertung, dass Prozessparameter unterhalb eines Grenzwertes einen zu vernachlässigbaren Einfluss auf das Prozessergebnis haben. Am Beispiel der Paretoauswertung für die Umschmelzbreite aus Bild 36a liegt dieser Grenzwert bei 2.

Bild 36b zeigt die Erkennungsqualität des oben vorgestellten Indikators für die Umschmelzbreite am Beispiel einer Strahldurchmesservariation für zwei Vorschubgeschwindigkeiten. Dabei erkennt der Indikator die Umschmelzbreite für zwei verschiedene Extremzustände. Im ersten Fall, bei einer Spotbreite von 10mm, ist die eingebrachte Energie so groß, dass Schmelzbadströmung und Wärmeleitung das Schmelzbad über den Strahldurchmesser ausdehnen. Das Schmelzbad wird am Rand ohne einstrahlende Laserenergie, durch Wärmeleitung im Grundwerkstoff über

Schmelztemperatur erwärmt und die resultierende Isotherme von der Prozessdiagnose korrekt erkannt. Im zweiten Fall von 16mm Spotbreite reicht die Energiedichte des Lasers in den Randbereichen nicht aus, um den Grundwerkstoff anzuschmelzen. Sowohl das Coating als auch der Grundwerkstoff erreichen in diesem Bereich die Schmelztemperatur des Grundwerkstoffes nicht. Die Umschmelzbreite ist geringer als die Spotbreite und die Schmelzbadisotherme wird von der Bildanalyse korrekt kleiner als die Wechselwirkungszone erkannt.

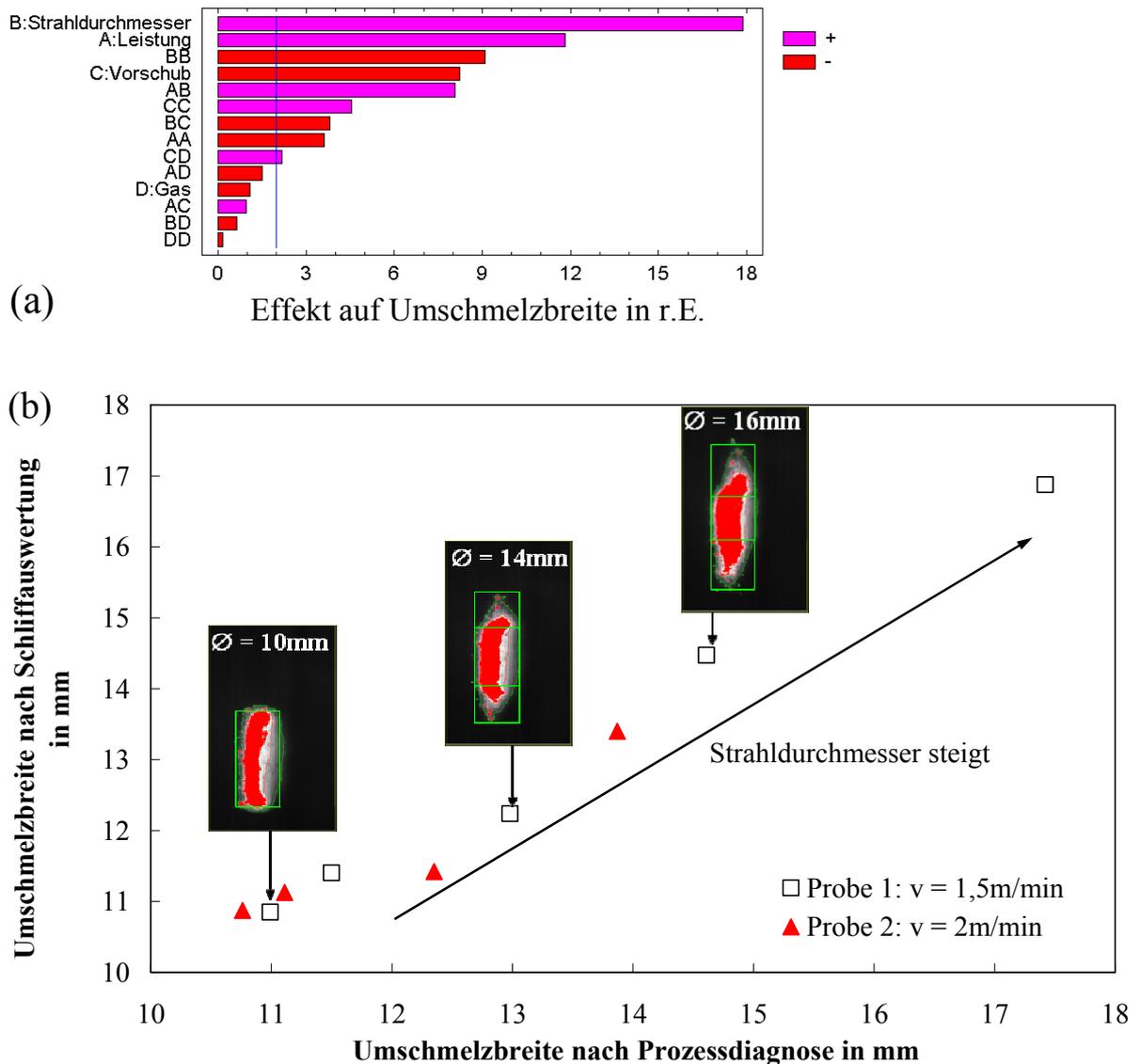


Bild 36: (a) Paretdiagramm der Wechselwirkungen zwischen Prozessparameter und Umschmelzbreite nach [8]. (b) Erkennung der Umschmelzbreite bei verschiedenen Strahldurchmessern und Vorschubgeschwindigkeiten.

Ziel der Indikatoren dieser Arbeit ist es das Prozessergebnis unabhängig von seinen verursachenden Prozessparametern zu erkennen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Parametervariationen mit einem kreisförmigen Laserspot durchgeführt. Das Ergebnis einschließlich einer Einschränkung des Indikators ist in Bild 37 dargestellt. Während die Umschmelzbreite bei der Änderung der Laserleistung noch zuverlässig erkannt wird, stellen sich sehr hohe Vorschubgeschwindigkeiten als kritisch in Bezug auf die Breitenerkennung heraus. Ist die Vorschubgeschwindigkeit entsprechend hoch, reduziert sich die Bestrahlzeit durch den Lasers so stark, dass:

- die absorbierte Energiemenge nur zum Erhitzen des Coatings aber nicht für den Grundwerkstoff reicht.
- nur noch ein geringer Wärmeübergang zwischen Coating und Grundwerkstoff stattfindet.

Der Indikator erkennt in diesem Fall eine Isotherme im Coating, die nicht mit einer Isotherme des unmittelbar darunter liegenden Grundwerkstoffes übereinstimmt und somit nicht identisch mit der Umschmelzbreite ist. Speziell bei kreisförmigen Strahlquellen, deren Bestrahlzeit an den Spotaußenseiten stark abnimmt, kommt es wie Bild 37 zeigt, ab einer Grenzgeschwindigkeit zu Fehlmessungen.

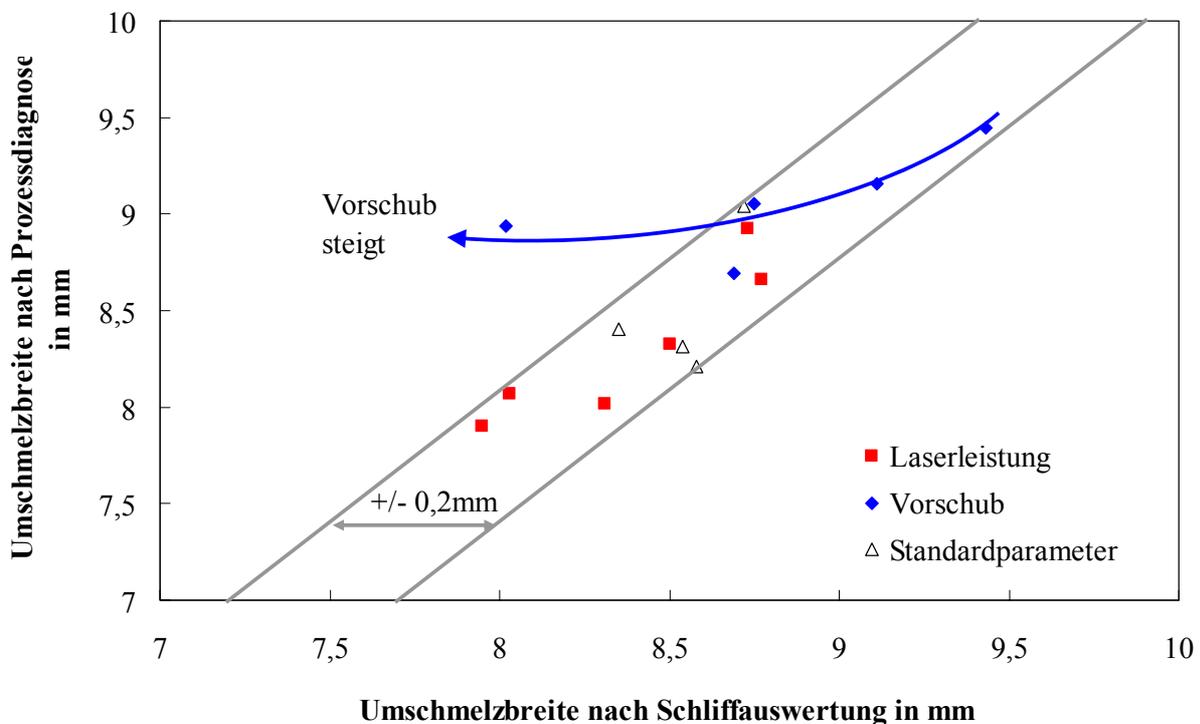


Bild 37: Diagnose der Umschmelzbreite durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur Querschliffauswertung bei verschiedenen Prozessparametern.

Zur Vermeidung derartiger Messfehler kann in der Mess- und Auswertestrategie des Online-Prozessdiagnosesystems die Bearbeitungszeit überwacht und das Überschreiten der Grenzgeschwindigkeit erkannt werden. Schließt man diesen Prozesszustand aus, ist der Indikator durch die Erkennung der Schmelzisotheime in der Lage die Umschmelzbreite zu bewerten.

### 4.1.3 Bewertung der Umschmelztiefe

Die Umschmelztiefe ist die Distanz zwischen Werkstückoberfläche und dem tiefsten Punkt im Werkstück, der noch durch den Phasenwechsel homogenisiert wurde. Die Umschmelztiefe steht mit dem Spurvolumen als maximale Eindringtiefe einer kreissegmentartigen Umschmelzspur in Verbindung. Darum ist bei der Konstruktion umzuschmelzender Bauteile zu beachten, dass sich die zahlenmäßig angegebene Umschmelztiefe nicht über den gesamten Spurquerschnitt erstreckt, sondern wie die Umschmelzbreite einem Maximalwert der Schmelzbadausprägung entspricht. Ausgewertet werden Umschmelztiefen bedarfsorientiert mittels Proben aus Quer- und Längsschliffen entsprechend Bild 38, die mit dem Mikroskop analysiert werden. Beide Schliffpräparationen beinhalten Nachteile. Der Querschliff erlaubt das exakte Vermessen der absoluten Umschmelztiefe. War die Spur in ihrem Verlauf ungleichmäßig, wird das im Querschliff nicht erkannt. Der Längsschliff erkennt Unregelmäßigkeiten in der Spurtiefe entlang des Prozessverlaufes. Problematisch hierbei ist, dass nicht sichergestellt werden kann, ob bei der Schliffpräparation exakt die Spurmitte getroffen wurde und somit die absolute Spurtiefe vermessen wird.

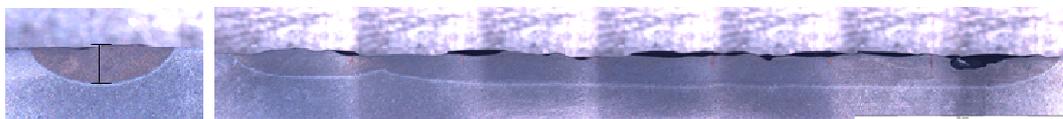


Bild 38: (links) Fotografie eines Querschliffes und (rechts) eines Längsschliffes zur Vermessung der Spurtiefe.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen von Ohmle [8] haben ein optimiertes Prozessfenster und einen ersten Ansatz zur Diagnose der Umschmelztiefe entwickelt. In Kamerabildern einer CCD-Kamera wurden Graustufenbereiche identifiziert, die tendenziell mit der Umschmelztiefe korrelieren. Die Methode ist in Bild 39 dargestellt

und funktioniert wegen ihres robusten, einfachen Prinzips über einen großen Bereich an Prozessparametern. Sie erfüllt jedoch nicht die hohen Anforderung der Industrie die Umschmelztiefe auf  $\pm 0,2\text{mm}$  zu erkennen.

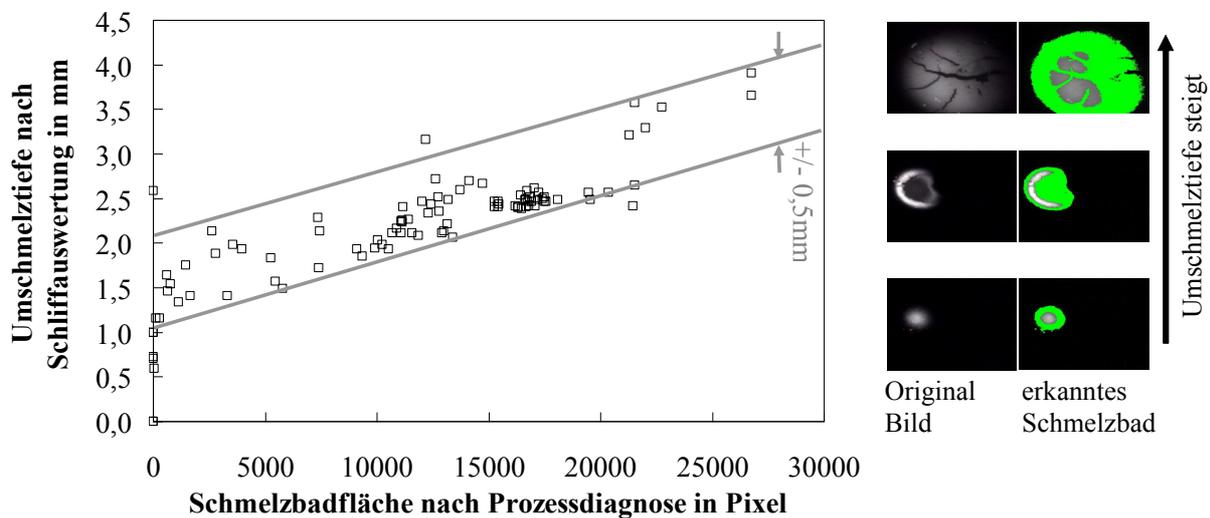


Bild 39: Diagnose der Umschmelztiefe mittels einer CCD-Kamera durch Auswertung der Schmelzbadfläche nach [8].

Thermographieaufnahmen am Beispiel ansteigender Energiedichten in Bild 40a sollen Aufschluss über die Vorgänge in der Wechselwirkungszone geben. Sowohl die Momentaufnahmen der CCD- und Thermokamera als auch das Temperaturprofil zeigen mit steigender Energiedichte einen höheren Temperaturgradienten im vorderen Teil der Wechselwirkungszone. Im hinteren Teil der Wechselwirkungszone zeigt das Kamerabild mit zunehmender Energiedichte einen steilen Helligkeitsabfall, welcher nicht nur ein Temperaturgradient sondern ein Abfall des Emissionskoeffizienten ist. Dieser Abfall im Emissionskoeffizienten liegt an der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Veränderung des Coatings mit steigender Energiedichte. Das Coating ist in seinem Grad der Zerstörung in der Spurfotographie in Kombination mit einer steigenden Umschmelztiefe in Bild 40a erkennbar. Ein Optimum im Umschmelzprozess ist erreicht, wenn die maximale Energie vor der Zerstörung des Coatings durch das selbige aufgenommen wird und nur ein kleiner Anteil Laserstrahlung auf das flüssige Aluminiumschmelzbad trifft. Der Temperaturgradient im Aufheizbereich sollte bis zu dem in Bild 40b dargestellten Optimum erhöht werden, wodurch das kreisförmige Emissionsbild leicht sichelförmig wird und sich die Umschmelztiefe einem Grenzwert nähert. Dieses Optimum ist ein Gleichgewicht der maximal nutzbaren Energiedichte und dem werkstoffabhängigen Wärmeleitungsvermögen. Beim Überschreiten des



Basierend auf den oben genannten, vorhandenen Erkenntnissen werden in dieser Arbeit Untersuchungen mit neuartigen **CMOS-Kameras** durchgeführt und die detaillierten Informationen aus der Wechselwirkungszone genutzt um präzisere Indikatoren zur Erkennung der Umschmelztiefe als die bisherigen Graustufenbereiche zu finden. Der Temperaturgradient im Aufheizbereich des Werkstückes, erkennbar an der Charakteristik der Sichel- und Schmelzbadfläche, bietet dafür Potential. Bild 41 zeigt vier verschiedene Energiedichten einer kreisförmigen Strahlquelle und deren Auswirkung auf die Emissionen aus der Wechselwirkungszone. Der Schwerpunkt der Sichelfläche in Vorschubachse korreliert dabei mit der Umschmelztiefe im Grundwerkstoff. Es wird davon ausgegangen, dass ein Schwellenwert in der Energiedichte überschritten werden muss, um ein Einkoppeln zu erreichen und den Umschmelzprozess zu starten. Dieser Schwellenwert ist in Bild 41a prinzipiell durch die dünne, waagerechte Linie angedeutet. Die unterschiedlichen Energiedichten werden durch die Verteilungskurven nach Gauß auf verschiedenen Höhenniveaus dargestellt. Der Schnittpunkt der Schwellenwertgeraden mit der Gaußkurve stellt die Einkoppelposition relativ zum Strahldurchmesser dar. Mit zunehmender Energiedichte wandert die Position der Einkopplung in Vorlaufrichtung

Das Ende der Sichelfläche wird durch eine Kombination aus Energiedichte und Bestrahlzeit erklärt. Je höher die Energiedichte desto kürzer ist die Zeit, die das Coating der Strahlung standhält und umso schmaler wird die Sichel. Die beiden Effekte, eine Sichelfront und eine Sichelendkante die mit zunehmender Energiedichte in Vorlaufrichtung wandern, addieren sich zu einer in Vorlaufrichtung wandernden Sichel mit zunehmender Umschmelztiefe. Eine Auswertung des Sichelschwerpunktes, wie in Bild 41b angedeutet, ermöglicht den Rückschluss auf die Umschmelztiefe. Die Trennschärfe, mit welcher der Sichelschwerpunkt die vier Versuche mit Umschmelztiefen von 1,9mm – 2,4mm über den gesamten Prozessverlauf trennt (siehe Bild 41c), veranschaulicht das Potential des Indikators.

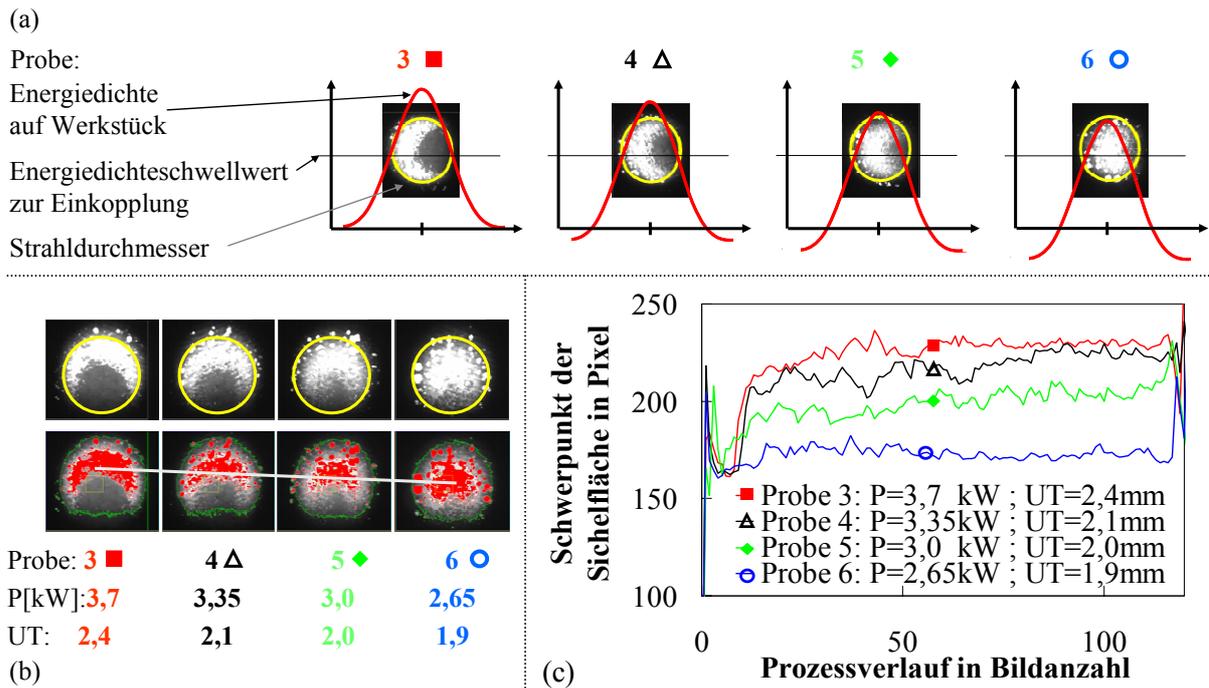


Bild 41: (a) Vergleich der Strahldurchmesserposition zur Position des Energieschwellwertes zur Einkopplung und dem Energieniveau am Werkstück, (b) Position des Sichelflächenschwerpunktes zur Strahldurchmesserposition auf dem Kamerachip als Indikator der Umschmelztiefe, (c) Sichelposition über den Prozessverlauf für verschiedene Umschmelztiefen.

Vergleicht man den Sichelschwerpunkt als Indikator für die Umschmelztiefe mit der realen Umschmelztiefe bei verschiedenen Parametervariationen, so lässt sich erkennen, ob der Indikator parameterabhängig oder qualitätsgrößenabhängig reagiert. Bild 42 stellt Diagramme dar, die jeweils bei einer Parametervariation den Wert für das Sensorergebnis mit der gemessenen Umschmelztiefe vergleichen. Zum Vergleich von Sensorergebnis zu Umschmelztiefe wurde im Mittelbereich der umgeschmolzenen Spur ein Querschliff erzeugt und vermessen. Ebenfalls im Mittelbereich des Prozessverlaufes wurde ein Durchschnittswert aus den Sensordaten gebildet.

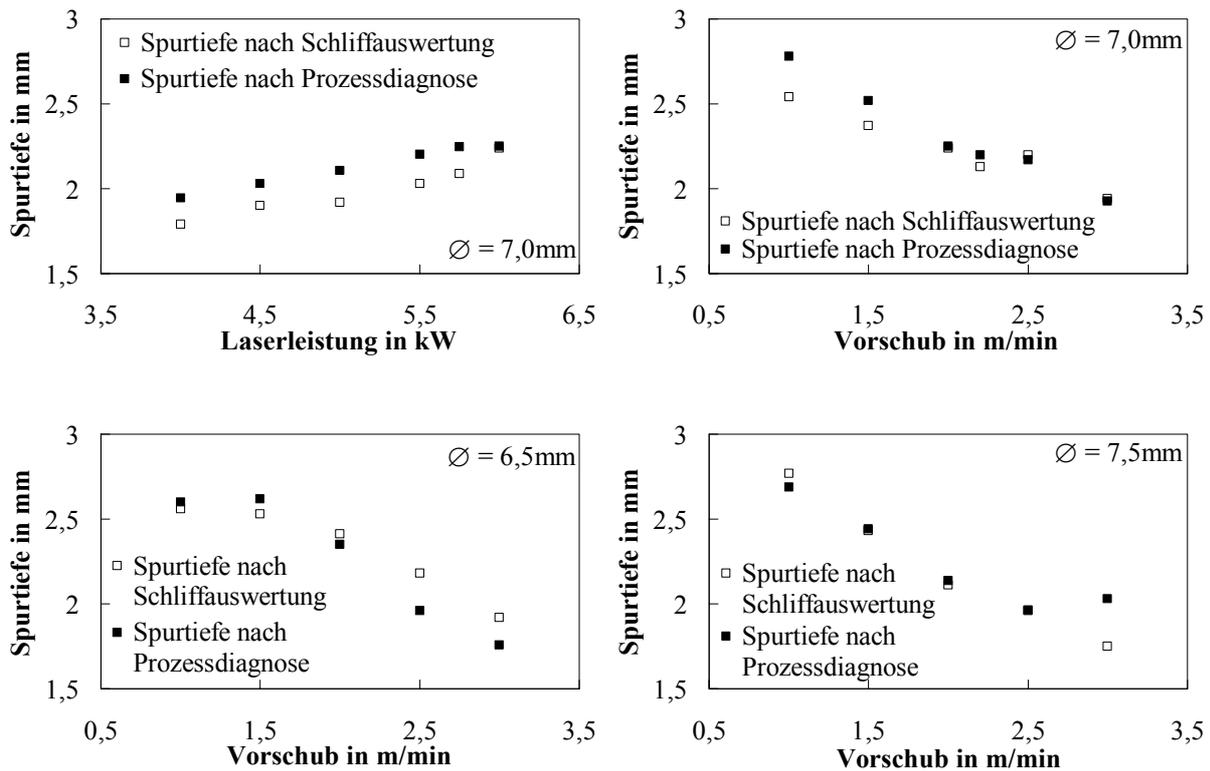


Bild 42: Diagnose der Umschmelztiefe durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur Querschliffauswertung bei jeweils einer Prozessparametervariation.

Eine weitere wichtige Eigenschaft eines Online-Prozessdiagnosesystems ist neben der Trennschärfe eine parameterübergreifende Erkennung der Qualitätsgrößen. Das System muss in der Lage sein, die absolute Umschmelztiefe ohne die Kenntnis der eingestellten Parameter zu erkennen. Dass der Schwerpunkt der Sichelfläche als prozessparameterunabhängiger Indikator für die absolute Umschmelztiefe geeignet ist, zeigt Bild 43. Das Diagramm zeigt eine Gegenüberstellung der Sichelschwerpunkte und der vermessenen, realen Umschmelztiefe bei verschiedenen Parametervariationen. Die in den Qualitätsanforderungen geforderte Trennschärfe, die Umschmelztiefe mit einer Toleranz von  $\pm 0,2\text{mm}$  zu erkennen, wird nach Bild 43 bis auf einen Messwert erreicht.

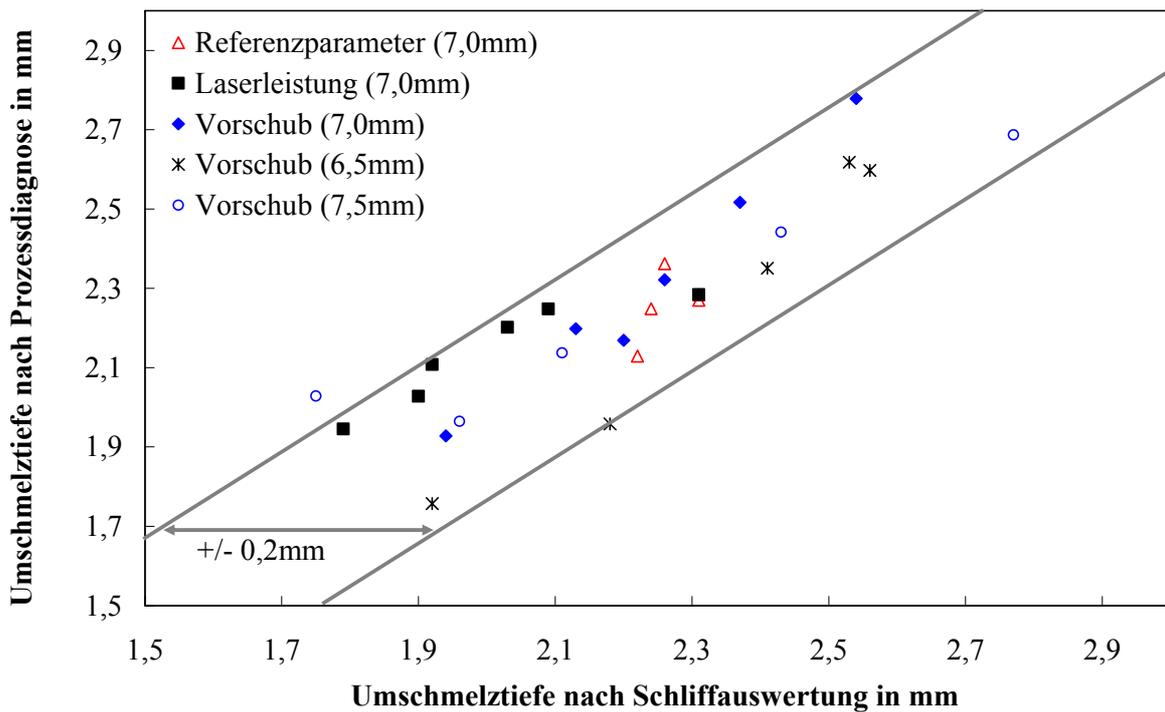


Bild 43: Diagnose der Umschmelztiefe durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur Querschliffauswertung bei verschiedenen Prozessparametervariationen und Strahldurchmessern.

Grundvoraussetzung für eine zuverlässige Diagnose der Umschmelztiefe ist eine entsprechend ausgeprägte Wechselwirkungszone, die ein CMOS-Chip in Form einer Sichelfläche und einem Schmelzbad auflöst. Bild 44 zeigt das Prozessergebnis und das Ergebnis der Kameraauswertung bei einer Leistungsrampe von 6 auf 0kW. Die Umschmelztiefe wird dabei von der Prozessdiagnose bis zu einer Laserleistung von ca. 1,2kW erkannt. Unterhalb dieser Leistung ist das Coating nur noch wenig verändert, nachdem es bei hohen Leistungen in die Oberfläche eingebrannt und in einem Übergangsbereich derartig verändert wird, dass es nach der Bearbeitung durch leichtes Bürsten entfernt wird. Ab diesem Punkt ist die Energiedichte so gering, dass nur eine geringe Umschmelztiefe, eine geringe Coatingveränderung und keine vom Prozessdiagnosesystem korrekt auswertbare Wechselwirkungszone vorliegen. Die Bildauswertung kann durch einen weiteren Algorithmus, den Formfaktor, die Emissionen aus der Wechselwirkungszone auf Plausibilität eines potentiellen Gut-Prozesses prüfen. Der Formfaktor, der in Kapitel 4.1.5 ausführlich beschrieben wird, erkennt ab dem Unterschreiten einer minimalen Energiedichte einen Prozessfehler. In diesem Bereich werden nur noch minimale Umschmelztiefen erzeugt wodurch die fehlende Umschmelztiefeninformation entbehrlich wird.

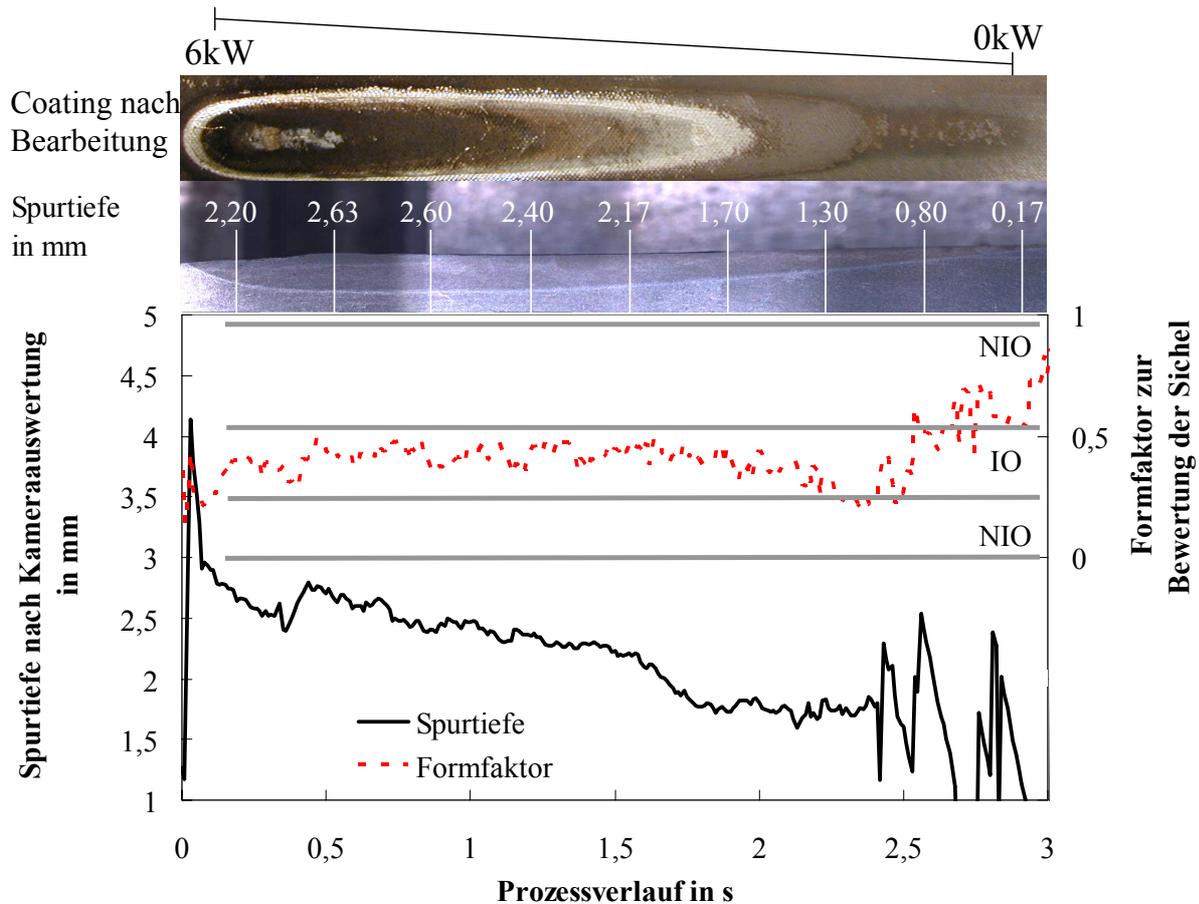


Bild 44: Diagnose der Umschmelztiefe durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zu einem Längsschliff bei einer abfallenden Laserleistungsrampe. Prüfung der Prozessemissionen durch den Formfaktor der Sichel als Klassifizierung des Zustandes der Wechselwirkungszone.

Die Übertragbarkeit auf andere Strahlquellen ist nicht ohne Einschränkungen gegeben. Beim Einsatz eines rechteckigen Laserspots muss der Algorithmus erweitert werden um die Umschmelztiefe zuverlässig zu erkennen. Bild 45a zeigt die inkorrekte Erkennung der Umschmelztiefe durch den ursprünglichen Umschmelztiefenindikator. Durch die Erweiterung des Analysealgorithmus der Sichelposition mittels der Information der Sichelbreite im Stegbereich wird die geforderte Erkennungsleistung wieder erreicht (siehe Bild 45b). Um die Sichelposition mit der Sichelbreite zur diagnostizierten Umschmelztiefe verrechnen zu können werden die Faktoren  $a$  und  $b$  eingesetzt.

Als Indikator der Umschmelztiefe muss, abhängig von der Strahlquelle eine Fallunterscheidung durchgeführt werden.

Indikator 1 für kreisförmigen Laserspot:

**Sichelposition**

Indikator 2 für rechteckigen Laserspot:

**a \* Sichelposition + b \* Sichelbreite**

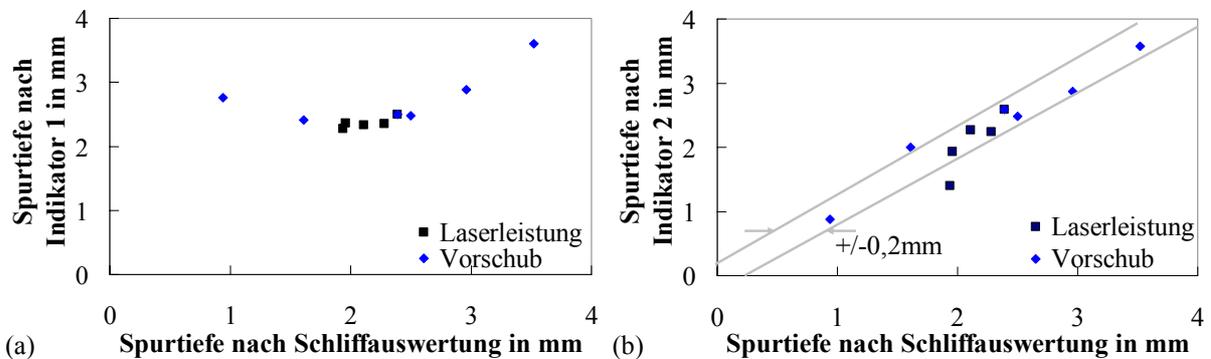


Bild 45: Diagnose der Umschmelztiefe bei einem Prozess mit rechteckigem Laserspot durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur Querschlifffauswertung mittels (a) Indikator 1 für kreisförmigen Laserspot und (b) Indikator 2 für rechteckigen Laserspot.

Die eingesetzten integral messenden Detektoren, ein **Temperatur-** und ein **Rückreflexsensor**, konnten zeigen, dass relative Tendenzen innerhalb einer Parametervariation in Verbindung mit der Umschmelztiefe korrekt erkannt werden. Die Erkennung der absoluten Umschmelztiefe scheitert aber an der dominierenden Überlagerung der Laserleistungserkennung (siehe Bild 46). Die oben beschriebene orts aufgelöste Intensitätsauswertung eines Kamerabildes durch die Analyse des Sichelschwerpunktes scheint für die Diagnose der Umschmelztiefe eine notwendige Information zu sein. Diese Information kann von einem Infrarot- oder Rückreflexsensor der die Wechselwirkungszone integral auswertet nicht erbracht werden.

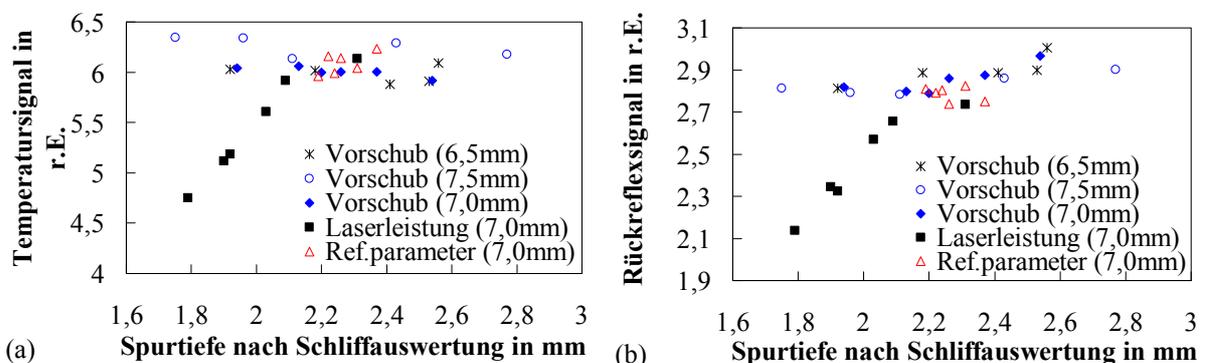


Bild 46: Korrelation des Messsignals (a) eines Temperatursensors und (b) eines Rückreflexsensors zur realen Umschmelztiefe.

Da der auf einen Durchschnittswert verdichtete Wert der gemessenen und diagnostizierten Umschmelztiefe ein umfangreiches Bild der Erkennungsqualität gibt, aber keine Aussage über die Trägheit des Indikators liefert, wurden Umschmelzversuche mit Parameteränderungen während dem Prozess durchgeführt und ausgewertet. Dabei werden weitere Unterschiede von **Temperatursignal** und **Kameraauswertung** aufgezeigt. Die sprungartigen Änderungen der Laserleistung in Bild 47 während des Prozesses werden vom Temperatursignal zum Zeitpunkt der Änderung erkannt. Die kamerabasierende Auswertung reagiert dagegen verzögert, träger und nicht sprungartig. Dies ist dem ebenfalls trägen Wärmeleitungsverhalten in der Umschmelztiefe, im Längsschliff erkennbar, ähnlich. Es steht damit eine Laserleistungskontrolle in Form des Temperatursignals und eine Umschmelztiefenkontrolle durch die Auswertung der Sichelflächenposition der Kamerabilder zur Verfügung.

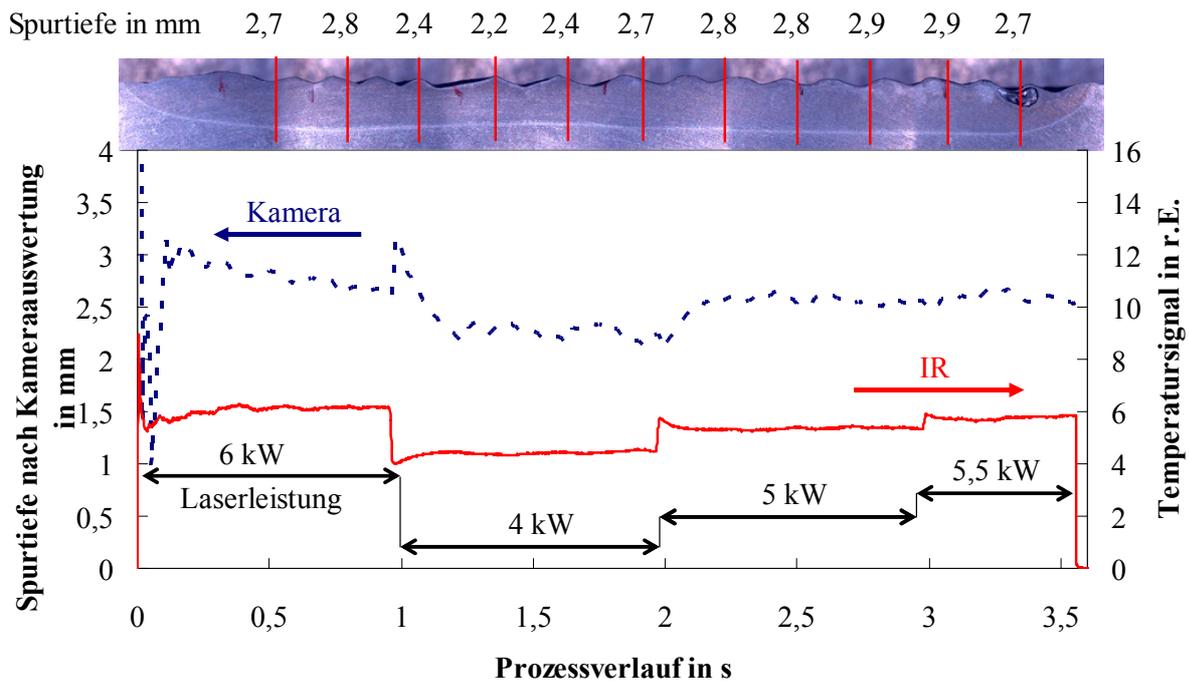


Bild 47 Diagnose der Umschmelztiefe durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zu einem Längsschliff bei sprungartigen Änderungen der Laserleistung. Diagnose der sprungartigen Änderungen der Laserleistung durch den Temperatursensor.

#### 4.1.4 Erkennung von Coatingfehlern

Der Werkstoff Aluminium, mit seiner Eigenschaft die Laserleistung vorwiegend zu reflektieren, ist zum Umschmelzen wenig geeignet. Damit ein Umschmelzen von Aluminium unter wirtschaftlichen Bedingungen möglich ist wird auf den Aluminiumgrundkörper eine dünne Schicht aufgetragen, um die Absorptionsfähigkeit zu erhöhen. Diese Schicht wird im Folgenden Coating genannt um eine Verwechslung mit den im Kapitel 4.2 beschriebenen Laserbeschichtungen zu vermeiden. Das Coating muss folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die Coatingschicht soll die Schwelle zum Einkoppeln der Laserstrahlung so weit wie möglich senken. Damit wird schon in den Randbereichen der Intensitätsverteilung die Laserenergie absorbiert und der Umschmelzprozess kann früher einsetzen.
- Die Coatingschicht soll einen deutlich höheren Absorptionsgrad als das Aluminium haben um damit ein Maximum der Laserstrahlung in der Wechselwirkungszone zu absorbieren.
- Die Coatingschicht soll eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen. Das Coating wird durch die hohe Energiedichte eines Bearbeitungslasers trotz Schutzgasatmosphäre in seiner Eigenschaft verändert. Eine hohe Beständigkeit des Coatings bewirkt, dass die gute Absorptionsfähigkeit in einem möglichst großen Teil der Wechselwirkungszone zur Verfügung steht.
- Die Coatingschicht soll keine negative Auswirkung durch chemische Wechselwirkungen mit dem Grundwerkstoff oder durch Einlagerungen von untergespültem Coating in der Spur erzeugen.

Die absorptionserhöhende Wirkung des Coatings hat Einfluss auf die Spurbreite, da die herabgesetzte Einkoppelschwelle die Laserstrahlung im Randbereich der Intensitätsverteilung zum Umschmelzen nutzbar macht. Die insgesamt stark erhöhte absorbierte Energiemenge wirkt sich steigernd auf das Spurvolumen und damit auch auf die Umschmelztiefe aus. Beschädigungen im Coating entstehen nicht während des Prozesses wie Schutzgas- oder Positionierfehler, sondern das Coating ist schon vor Bearbeitungsstart defekt. Ursachen dafür sind:

1. unvollständiges oder fehlerhaft aufgetragenes Coating im Vorbearbeitungsschritt (siehe Kapitel 4.1.4.1)

2. Beschädigung eines korrekt aufgetragenen Coatings z.B. beim Transport zur Laserbearbeitungsanlage (siehe Kapitel 4.1.4.1)
3. falsches Coating im Vorbearbeitungsschritt aufgetragen (siehe Kapitel 4.1.4.2)

#### 4.1.4.1 Prozessfehler durch beschädigtes Coating

Punkt 1 und 2 aus Kapitel 4.1.4 zeigen, dass Fehlstellen im Coating in allen Variationen, vom kleinen Kratzer beim Transport bis hin zur teilweise fehlenden Schicht durch Fehler beim Auftragen des Coatings auftreten können. Da die Wärmeleitung beim Umschmelzen träge ist, wird zum Auslegen der Auswertestrategie die Grenzfehlergröße eines Coatingfehlers mit Einfluss auf den Umschmelzprozess und die Erkennungsqualität verschiedener Sensoren ermittelt. Die Draufsichtabbildung und der Schliff der umgeschmolzenen Spur aus Bild 48 lassen den Schluss zu, dass vereinzelt auftretende Coatingfehler mit einer Ausdehnung kleiner als 1mm keine Auswirkung auf das Prozessergebnis haben. Dennoch können Beschädigungen kleiner 1mm von verschiedenen Sensoren erkannt werden.

Die Messwerte zur umgeschmolzenen Spur in Bild 48 sind vom Rückreflex- und Temperatursensor im Teil (a) und von der CMOS-Kamera im Teil (b) dargestellt. Dass integrale Sensoren hierfür adäquat zu orts aufgelösten Sensoren geeignet sind liegt in der Messaufgabe. Coatingdefekte durch partielle Fehlstellen haben über den gesamten Prozessverlauf gesehen Bereiche mit relativen Abweichungen der Prozessemissionen vom Normalbereich. Sowohl der Rückreflexsensor als auch eine Auswertestrategie der Kamerabilder können Defekte bis zu wenigen Zehntel Millimetern erfassen.

Die gute Erkennung solcher Defekte durch den Rückreflexsensor lässt sich durch das Reflektieren der Laserstrahlung auf dem blanken Aluminium begründen. Das Temperatursignal, welches träger und unsensibler auf Coatingdefekte reagiert, scheint vorwiegend die Wärmeverhältnisse im Schmelzbad abzubilden.

Die überzeugende Erkennungsqualität kleiner Coatingfehler durch den Rückreflexsensor kann von der hier verwendeten Kamera physikalisch nicht nachgestellt werden, weil der eingesetzte Kantenfilter vor der Kamera die reflektierte Laserstrahlung nicht passieren lässt. Aber Indikatoren, die das Schmelzbad bewerten, erreichen gleichgestellte Erkennungsqualitäten. Durch Auswertung von Schmelzbadgeometrien, im vorliegenden Fall der Sichelfläche, wird diese beim Umschmelzen minimaler Defekte geteilt. Die Trennung lässt zwei Sichelteile

entstehen, deren größere Fläche von der Summe der beiden Sichelteile um bis zu 50% abweicht. Dieses Größensignal liefert die gute Erkennungsqualität, die in Bild 48b dargestellt ist. Wertet man den Durchschnitt der Helligkeitsverteilung (MeanGrey) im Kamerabild, erhält man ein Signal für das Umschmelzergebnis. Erst wenn die Coatingdefekte so ausgedehnt sind, dass sich die durchschnittlich erkannte Helligkeit (MeanGrey) im Kamerabild drastisch senkt, wird die verringerte Umschmelztiefe auch im Schliffergebnis erkennbar.

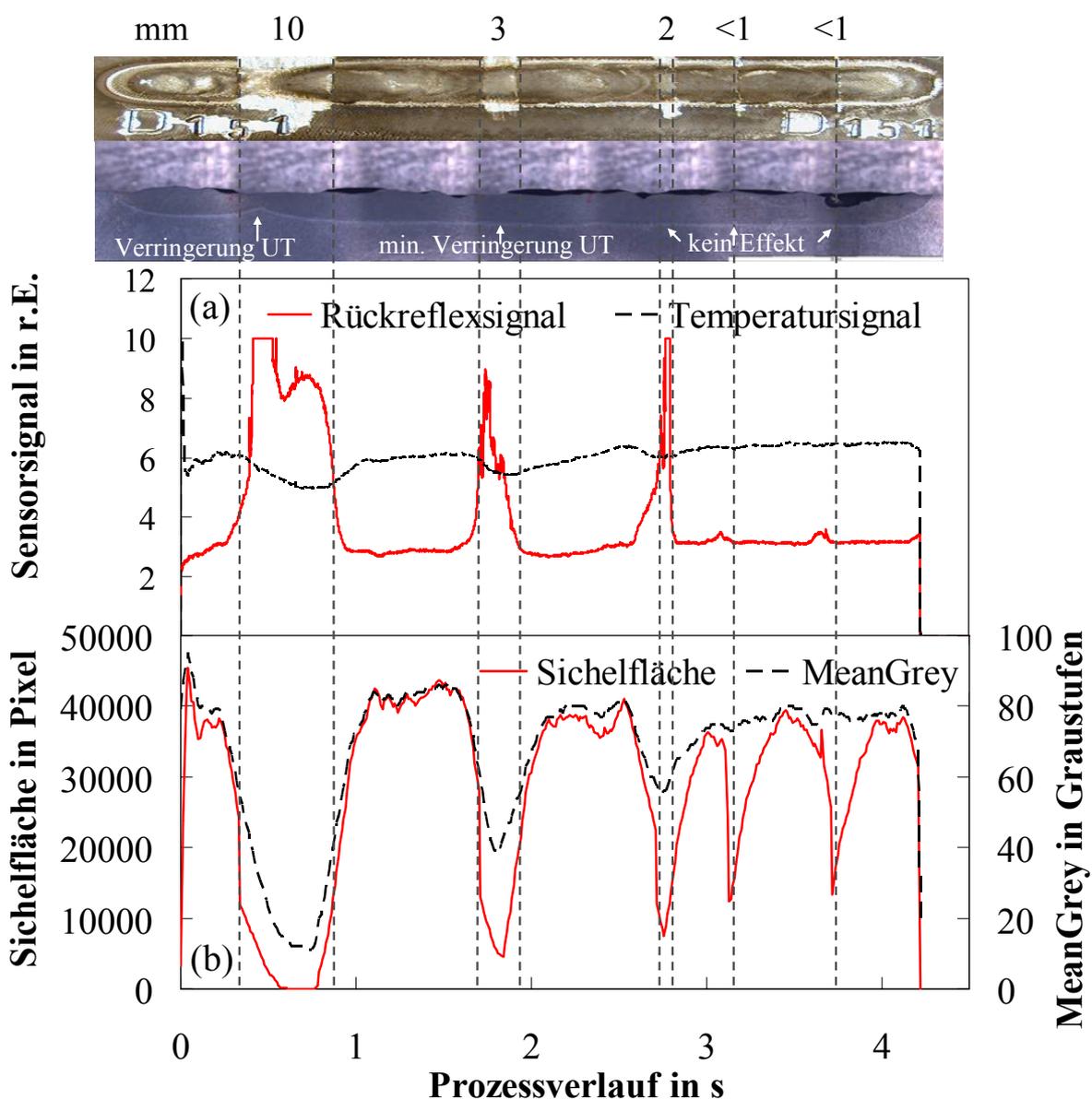


Bild 48: Diagnose von Coatingdefekten mit und ohne Einfluss auf das Prozessergebnis mittels (a) Rückreflex- und Temperatursignal und (b) Größe der zusammenhängenden Sichelfläche und durchschnittlichen Helligkeit (MeanGrey) im CMOS-Bild.

Beide Signale der Kamera oder die Kombination aus Rückreflex- und Temperatursensor sind wichtig, um bewerten zu können, welche Fehlergröße im Coating vorliegt und ob diese Fehlergröße Einfluss auf das Prozessergebnis hat. Viele kleine Coatingfehler, die vereinzelt keinen Einfluss auf die Prozessqualität haben, können in erhöhter Anzahl Auswirkungen auf die Umschmelzgeometrie haben. Daher ist es erforderlich, die Kombination aus Fehlergröße und Fehleranzahl zu überwachen.

#### 4.1.4.2 Prozessfehler durch Abweichungen in der Coatingart

Eine Forderung an das Coating ist eine möglichst hohe Resistenz gegen die Belastung durch Laserstrahlung, um die ursprünglichen Absorptionseigenschaften möglichst über die gesamte Wechselwirkungszone nutzen zu können. Dass dies nicht immer gegeben ist, zeigen die Bilder der CMOS-Kamera, in denen sich das Coating im Bereich der Sichelfläche im Gegensatz zum nachfolgenden Schmelzbad und der Umgebung in den Eigenschaften der Absorption und Emission unterscheiden lässt. Ob das Coating durch die Laserstrahlung, abhängig von der Energiedichte, zerstört bzw. verändert wird, zeigen die Unterschiede im Emissionsspektrum eines Spektrometers anhand von Bild 49. Das zu mehreren Messzeitpunkten während des Prozesses aufgenommene Spektrum einer nahezu unbeschädigten und einer stark veränderten Coatingschicht unterscheidet sich deutlich im Intensitätssignal, am Beispiel des Graphitcoatings speziell im Wellenlängenbereich von 500-700nm.

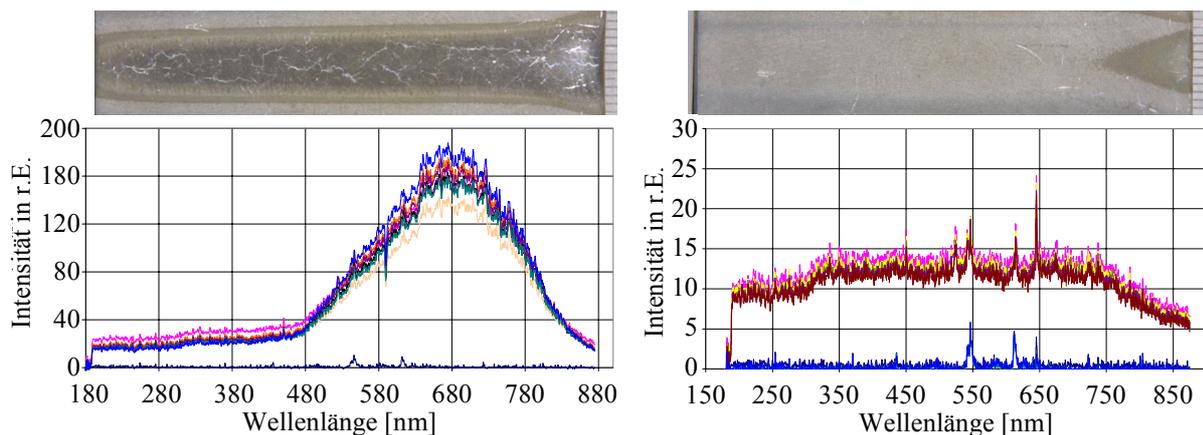
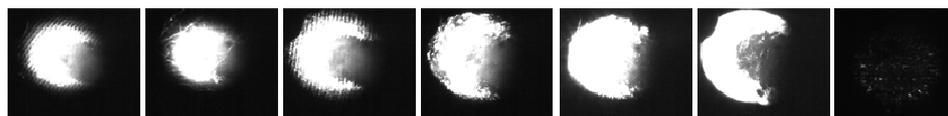


Bild 49: Unterschied der spektral aufgelösten Emissionen während des Laserumschmelzens mit (links) einer veränderten und (rechts) einer nahezu erhaltenen Coatingschicht aus Graphit. (Quelle: Dr. Jörg Höschele, Daimler-Chrysler AG, persönlicher Kontakt).

Verschiedene Arten von Coating zeigen unterschiedliche Auswirkungen auf das Prozessergebnis und die Prozessemissionen. Da das Risiko ein falsches Coating aufzutragen als gering bewertet wird, werden im Folgenden nur die Auswirkung auf Spurbreite und Spurbhöhe sowie das Kamerabild dargestellt (siehe Bild 50). Die Ausführung einer detaillierten Mess- und Auswertestrategie wird nicht aufgezeigt. Die Auswirkung verschiedener Coatingwerkstoffe auf Unterschiede im Kamerabild eines CMOS-Chip sind dabei weit größer als die auf die Umschmelzgeometrie. Dies spiegelt sich sowohl im Erscheinungsbild der Sichel- und der Schmelzbadfläche als auch in der Intensität der Emission wider. Die Belichtungszeit ist an die Intensität der Emissionen angepasst, da eine unangepasste Belichtungszeit vereinzelt vollständig überbelichtete Momentaufnahmen zur Folge hätte. Bei konstanter Belichtungszeit und damit überbelichteten Momentaufnahmen wären die inhaltlichen Unterschiede im Kamerabild nicht zu erkennen, die ausschließlich auf die verschiedenen Coatingwerkstoffe zurückzuführen sind, da die Prozessparameter konstant gehalten wurden.



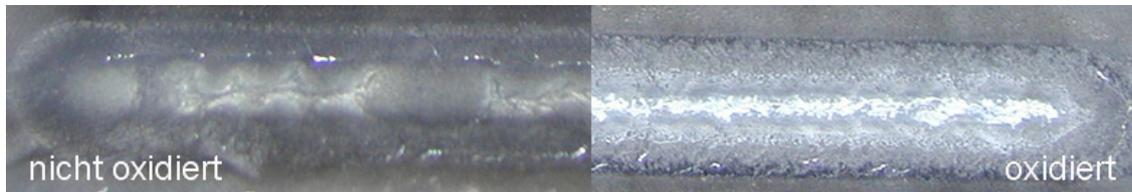
Probe	Coating 1	Coating 2	Coating 3	Coating 4	Coating 5	Coating 6	Aluminium
Belichtungszeit (ms)	0,6	0,43	0,25	0,25	0,16	0,03	0,04
Spurtiefe (mm)	(3,05)	3,15	3,05	3,16	2,54	3,30	
Spurbreite (mm)	(11,3)	11,4	12,26	11,95	9,97	12,56	

Bild 50: Momentaufnahmen der Prozessüberwachungskamera mit angepasster Belichtungszeit und Schliffauswertungen bei konstanten Umschmelzparametern und verschiedenen Coatingstoffen.

#### 4.1.5 Erkennung von mangelnder Schutzgaszufuhr

Ohne ausreichende Zufuhr von Schutzgas, z.B. Argon oder Stickstoff, reagiert der Aluminiumgrundwerkstoff in der Wechselwirkungszone mit dem Luftsauerstoff. Diese chemische Reaktion hinterlässt eine weiße Schicht aus Reaktionsprodukten des Coatingmaterials und des Aluminiumgrundwerkstoffes, vorwiegend Aluminiumoxid, auf der Oberfläche. Die Qualität der Spur wird dabei vorwiegend durch Wasserstoffeinschlüsse in der Spur beeinträchtigt, welche bei Oxidationsreaktionen mit

Aluminium entstehen können. Diese Oxidation ist eine exotherme Reaktion, deren freiwerdende Energie nach Gl.4.14 berechnet werden kann.



Aluminium + Luftsauerstoff → Aluminiumoxid



$$Q_O \rightarrow m_{mol} \cdot \Delta H_O \quad (4.14)$$

Die natürliche Oxidschicht von Aluminium beträgt 0,1 – 0,5µm, durch chemisches Eloxieren oder Laserstrahleinwirkung können Oxidschichten von 5 – 25µm erzeugt werden [1], [91]. Berechnet man damit die freiwerdende Wärme, liegt ein Energiegewinn von ca. 0,0085 J/mm<sup>2</sup> bei 0,1µm Schichtdicke und bis zu 2,12 J/mm<sup>2</sup> bei 25µm Schichtdicke vor. Dies entspricht in der Energiebilanz aus Kapitel 4.1.1.2 einem Wärmegegewinn von ca. 0,06% (0,1µm) - 14% (25µm).

Weitaus bedeutender als der Wärmegegewinn durch die freiwerdende Oxidationsenthalpie ist die Änderung des Absorptionskoeffizienten. Anstelle des flüssigen Schmelzbades entsteht in der Wechselwirkungszone eine Schicht aus Aluminiumoxid. Dieses Aluminiumoxid liegt umso flächendeckender und dichter vor, je stärker die Oxidationsreaktion und somit je geringer die Schutzgasmenge ist. Der Übergangsbereich zwischen intakter Schutzgasatmosphäre und fehlendem Schutzgas in der Wechselwirkungszone verläuft sowohl im Prozessergebnis als auch in der prozessdiagnostischen Erkennung fließend. Durch das ansteigende Risiko qualitätsmindernder Wasserstoffeinschlüsse, speziell bei Aluminium, kann die ohne Schutzgas selbständig ablaufende Reaktion der absorptionserhöhenden Oxidschichtbildung nicht genutzt werden, um die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu steigern. Für die Erkennung von Oxidationsvorgängen, verursacht durch mangelnde Schutzgaszufuhr, können die veränderten Prozessemissionen der Wechselwirkungszone allerdings genutzt werden. Dominierender Effekt dabei ist der ansteigende Emissionskoeffizient, je nach Oxidationsgrad, der nach der Literatur und eigenen Untersuchungen deutlich höher ist als von festem und flüssigem Aluminium (siehe Bild 32). Durch den im Gegensatz zum flüssigen Schmelzbad stark erhöhten Emissionskoeffizient der Oxidschicht sind die Emissionen in der Wechselwirkungs-

zone nicht mehr in die Sichel- und Schmelzbadfläche differenzierbar sondern es emittiert eine durchgängig helle Fläche. Die Unterscheidung eines normalen Umschmelzprozesses von einem oxidierten Prozess ist prinzipiell über die Form der hellen Fläche, einmal als Sichelfläche und einmal als Fläche über den gesamten Brennfleck, möglich. Ein Formfaktor, der über den Maximalwert Eins bei einem Kreis definiert ist und gegen Null geht je unsymmetrischer und kreis entfernter das Objekt wird, klassifiziert die erkannte Fläche in ihrer Form. Wie Bild 51 (Stufe 1) zeigt, ist die orts aufgelöste Strahlung des hellen Bereiches im oxidierten Fall einem Kreis ähnlicher als einer Sichel. Die Sichel ist in einer Achse symmetrisch, in der dazu orthogonalen Achse dagegen nicht. Das setzt ihren Formfaktor herab und unterscheidet sie vom oxidierten Prozess.

Durch den Formfaktor allein lässt sich mangelnde Schutzgaszufuhr nicht eindeutig nachweisen, da durch geringe Energiedichten und hohe Vorschubgeschwindigkeiten ähnliche Formfaktoren des hellen Bereiches in den Emissionsbildern entstehen. Bild 51 (Stufe 2) zeigt ein Momentbild bei einer geringen Energiedichte, die das Coating so wenig verändert, dass keine Sichel entsteht. Auch bei einer hohen Vorschubgeschwindigkeit kann die Energiemenge oder die Wechselwirkungszeit für die nötige Veränderung des Coatings unter Umständen nicht ausreichen, um eine sichelförmige Emission in der Wechselwirkungszone zu erzeugen. Solche Prozess-emissionen resultieren aus Parameterkombinationen außerhalb des idealen Prozessfensters und stellen daher immer Prozessfehler dar, die erkannt und von einem Schutzgasfehler unterschieden werden sollten. Die Ursachen, also die physikalischen Mechanismen, die einen unzulässigen Prozesszustand entstehen lassen, stellen zugleich die Möglichkeit der Fehlerklassifizierung dar.

Eine zu geringe Energiedichte bewirkt ein Emissionsbild ähnlich einer Gaußverteilung. Die Wechselwirkungszone hat im Mittelpunkt ihr Temperaturmaximum, welches mit Entfernung zum Mittelpunkt durch die Intensitätsverteilung des Lasers abfällt. Im Kamerabild ist dieser geringe Temperaturgradient anhand des ausgedehnten Übergangs vom hellen Mittelpunkt zum schwarzen Hintergrund erkennbar.

Im Fall einer hohen Vorschubgeschwindigkeit benötigt das Coating einen größeren Anteil der Wechselwirkungszone, um die identische Bestrahlzeit eines normalen Prozesses zu erreichen. Das Coating weicht dadurch erst im hinteren Teil dem offenen Schmelzbad. Auch hier sind aufheizende und vor allem abkühlende Bereiche im hinteren Teil durch Übergangstemperaturen in Form von grauen Randbereichen erkennbar.

Die Oxidation dagegen, als positiv rückkoppelnder Effekt, bewirkt nicht nur eine große Umschmelztiefe sondern auch ein Emissionsbild eines hellen Bereiches, der über die vom Laser bestrahlte Fläche hinausgeht. Außerhalb des Strahldurchmessers entsteht ein hoher Temperaturgradient. Dieser starke Temperaturgradient ist im Kamerabild durch den raschen Übergang der hellen Fläche zum schwarzen Hintergrund mit nur minimalem Graustufenübergangsbereich erkennbar.

Analysiert man den Übergangsbereich im Kamerabild anhand der Fläche des Graustufenbereiches erhält man Informationen über den Temperaturgradient. Um aus dem Temperaturgradienten einen Grenzwert zur Unterscheidung von oxidierten Spuren zu den oben genannten anderen Prozessunregelmäßigkeiten zu erhalten, wird die Fläche des heißen Bereiches zur Fläche des Übergangsbereiches nach Stufe 2 aus Bild 51 ins Verhältnis gesetzt.

STUFE 1 (Erkennung von Prozessfehlern)				STUFE 2 (Fehlerklassifizierung)			
	normal	Oxidation		$P_L \downarrow$	$v \uparrow$	Oxidation	
Original			Prozessfehler erkannt				Prozessfehler erkannt
Geometrie							
Formfaktor	F1	F2 F2>F1	JA NEIN	F2	F2	F2	JA
Schwellenwert							
Grenzwert				G1	G2 G2<G1	G3 G3<G2<G1	JA
Algorithmus / Physik	 F1	 F2 F2>F1				 A <sub>1</sub> (T1) A <sub>2</sub> (T2)	
				$G = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\text{Übergangsbereich}}{\text{heiße Fläche}} = \frac{\text{Grauwertfläche}}{\text{weiße Fläche}}$			

Bild 51: Diagnose von Prozessfehlern durch die Prozessüberwachungskamera nach Stufe 1 und Klassifizierung der Prozessfehler hinsichtlich unzureichender Schutzgaszufuhr nach Stufe 2.

Der Formfaktor und der Grenzwert des Temperaturgradienten werden für jede Momentaufnahme der Prozessüberwachungssequenz analysiert und hinsichtlich Schutzgasfehler bewertet. Aufgrund von Schmelzbadschwankungen und

geringfügigen Unregelmäßigkeiten im Coating kann es vereinzelt vorkommen, dass nicht alle Momentaufnahmen eines Prozesses klar interpretierbar sind. Da Oxidation kein sporadisch auftretender Effekt ist, sondern mindestens einen gewissen Anteil der Spur betrifft, erfolgt die Fehlerbewertung auf Basis mehrerer aufeinander folgender Momentaufnahmen.

Bild 52a zeigt die Einzelbildbewertung nach der Formfaktoranalyse (Stufe 1) von Prozessen mit wenig und zu wenig Schutzgas, hohem Vorschub, geringer Energiedichte sowie acht Referenzspuren mit korrekten Parametern. Einzelbildbewertungen, die in Stufe 1 einen potentiellen Schutzgasfehlerkandidaten erkennen, werden in der zugehörigen Zeile zum zugehörigen Prozesszeitpunkt markiert. Umschmelzvorgänge ohne Prozessfehler bleiben unmarkiert.

Bild 52b zeigt die Einzelbildbewertung nach der Formfaktoranalyse (Stufe 1) und der Temperaturgradientenanalyse (Stufe 2) analog Bild 52a.

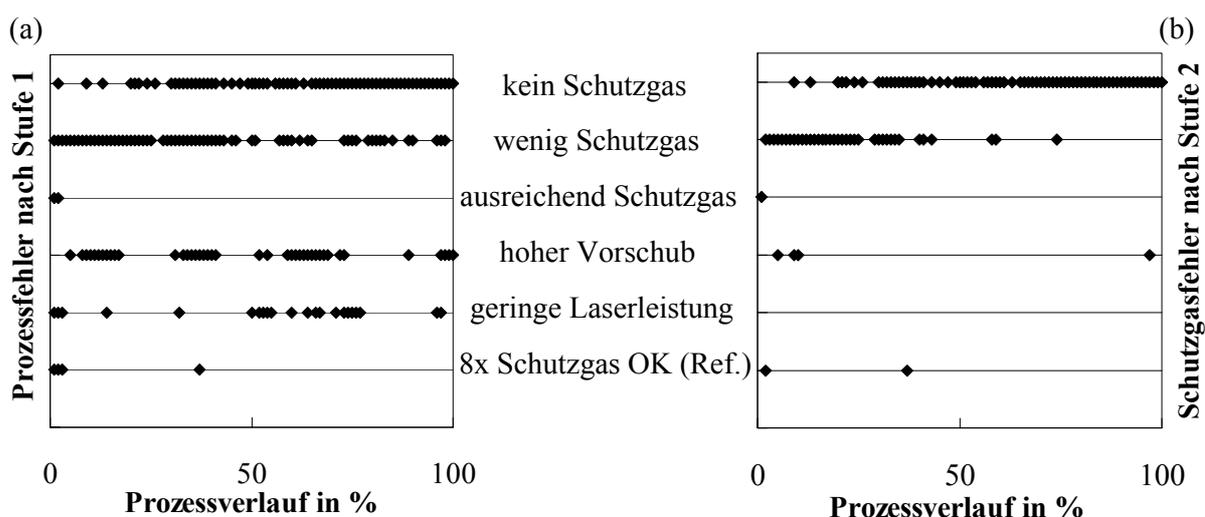


Bild 52: Diagnose von Prozessfehlern und Unterscheidung von Schutzgasfehlern zu weiteren Prozessfehlern durch kamerabasierende Prozessüberwachung in zwei Stufen.

Die Prozessbewertung erkennt folgende Effekte:

- Umschmelzvorgänge, die korrekt ablaufen, können von fehlerhaften Spuren durch den Formfaktor unterschieden werden. Solche fehlerhaften Prozesse zeichnen sich aus durch:
  - zu geringe Energiedichten

- zu hohe Vorschubgeschwindigkeiten
  - zu geringe Schutzgaszufuhr
- Die Formfaktoranalyse identifiziert Schutzgasfehlerkandidaten aus denen die Temperaturgradientenanalyse in einem zweiten Schritt Fehler in der Schutzgaszufuhr von anderen Fehlertypen unterscheiden kann.
  - Eine Übertragbarkeit der Erkennung von Schutzgasfehlern auf Strahlquellen mit rechteckigem Laserspot ist gegeben. Die Grenzwerte für den Formfaktor und den Temperaturgradienten müssen ggf. angepasst werden. Die Emissionsbilder sind jedoch analog einem Kreisspot auswertbar und differenzierbar. Bild 53a zeigt die Erkennung von Schutzgasfehlern bei rechteckigem Laserspot. Es wird im Prozessverlauf umso häufiger ein Schutzgasfehler erkannt desto weniger Schutzgas zugeführt wird.

Integrale Sensoren, in Bild 53b am Beispiel des Rückreflex-Signales gezeigt, können durch vom Normalprozess abweichende Emissionen ebenfalls auf die Oberflächenqualität schließen. Auffällig ist hierbei die Spur mit 160 l/h Schutzgaszufuhr im Übergangsbereich zum Schutzgasfehler aber mit atypischer Oberfläche. Ebenfalls wurde die Spur mit 0 l/h, also einem Schutzgasfehler, durch auffällige Spitzen im Signal als Abweichung vom Normalprozess erkannt.

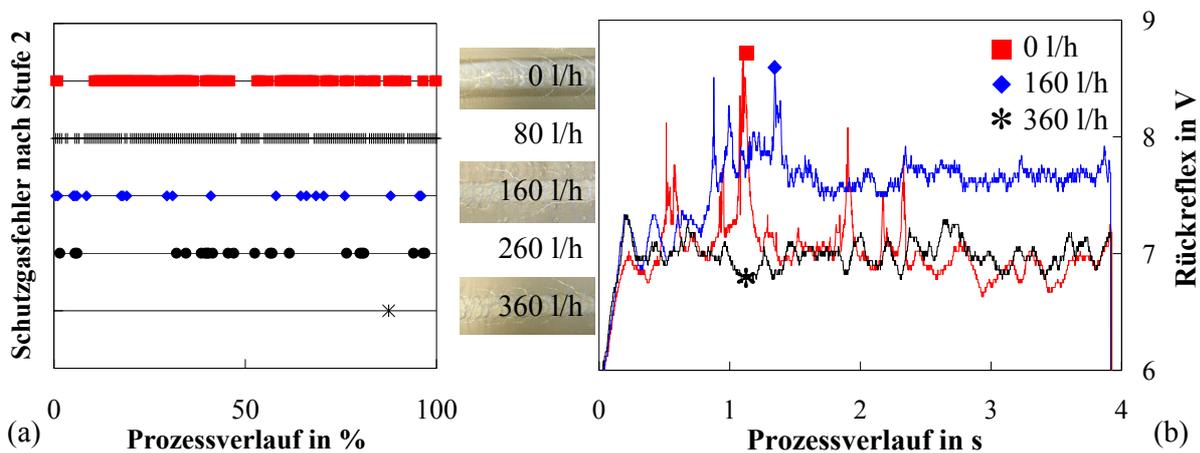


Bild 53: Diagnose von Schutzgasfehlern beim Umschmelzen mit dem Diodenlaser durch (a) die Prozessüberwachungskamera und (b) den Rückreflexsensor.

### 4.1.6 Erkennung von Fehlstellen im Grundmaterial

Lunker, eingeschlossene Gasvolumen im Grundwerkstoff, werden beim Umschmelzen je nach Lunkergröße und -position homogenisiert oder verursachen einen Qualitätsfehler. Die Eigenschaften eines Lunkers sind zugleich die Grundlage für dessen Erkennung. Das veränderte Oberflächen-/Volumenverhältnis zieht zusammen mit dem vorhandenen Gas in den Lunkereinschlüssen Prozessfehler nach sich, die mit Auffälligkeiten in den Emissionen korrelieren. Die vielen einzelnen Gaseinschlüsse in Kammern mit geringer Wandstärke, skizziert im Lunker aus Bild 54, bieten der Laserstrahlung eine große Oberfläche zum Absorbieren bei einer gleichzeitig verringerten Werkstoffmasse, die es zu schmelzen gilt. Der Lunkerbereich heizt sich beim Umschmelzen gegenüber dem normalen Werkstoff überdurchschnittlich auf (siehe Bild 55). Das im Lunker eingeschlossene Gas kann chemische Reaktionen verursachen, die in der Bearbeitungsspur und in den Prozessemissionen Unregelmäßigkeiten ähnlich einer Oxidationsreaktion aufzeigen.

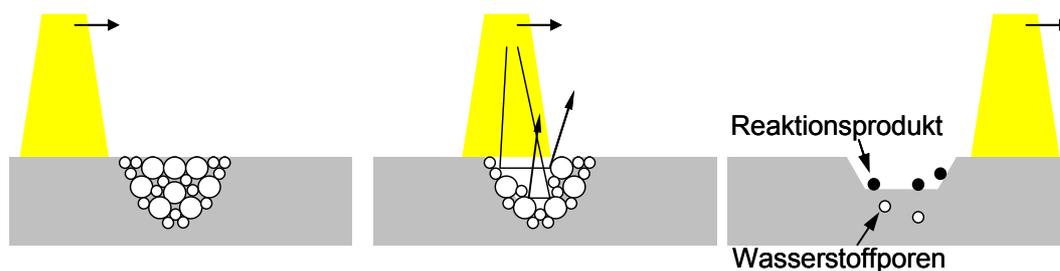


Bild 54: Schematische Darstellung der Vorgänge beim Umschmelzen eines Lunkers.



Bild 55: Bildsequenz beim Umschmelzen eines Lunkers mit jeweils einem normalen Emissionsbild am Beginn und am Ende.

Die intensiveren Emissionen im Lunkerbereich werden von einer Vielzahl von Sensoren erkannt. Temperatursensoren wie Pyrometer oder der hier eingesetzte Infrarotsensor in Form einer InGaAs-Diode erkennen die ansteigende Temperatur im Bereich von Lunkern in der Wechselwirkungszone. Der integral messende Rückreflexsensor erkennt Lunker anhand von unregelmäßigen Intensitäten die durch

Reflexionen an den Wänden der Gaseinschlüsse verursacht werden. Die kamerabasierte Erkennung von Lunkern wurde von Ohmle [8] nachgewiesen. Bild 56 zeigt die von Ohmle umgeschmolzenen Proben im Längsschliff mit den zugehörigen Messsignalen.

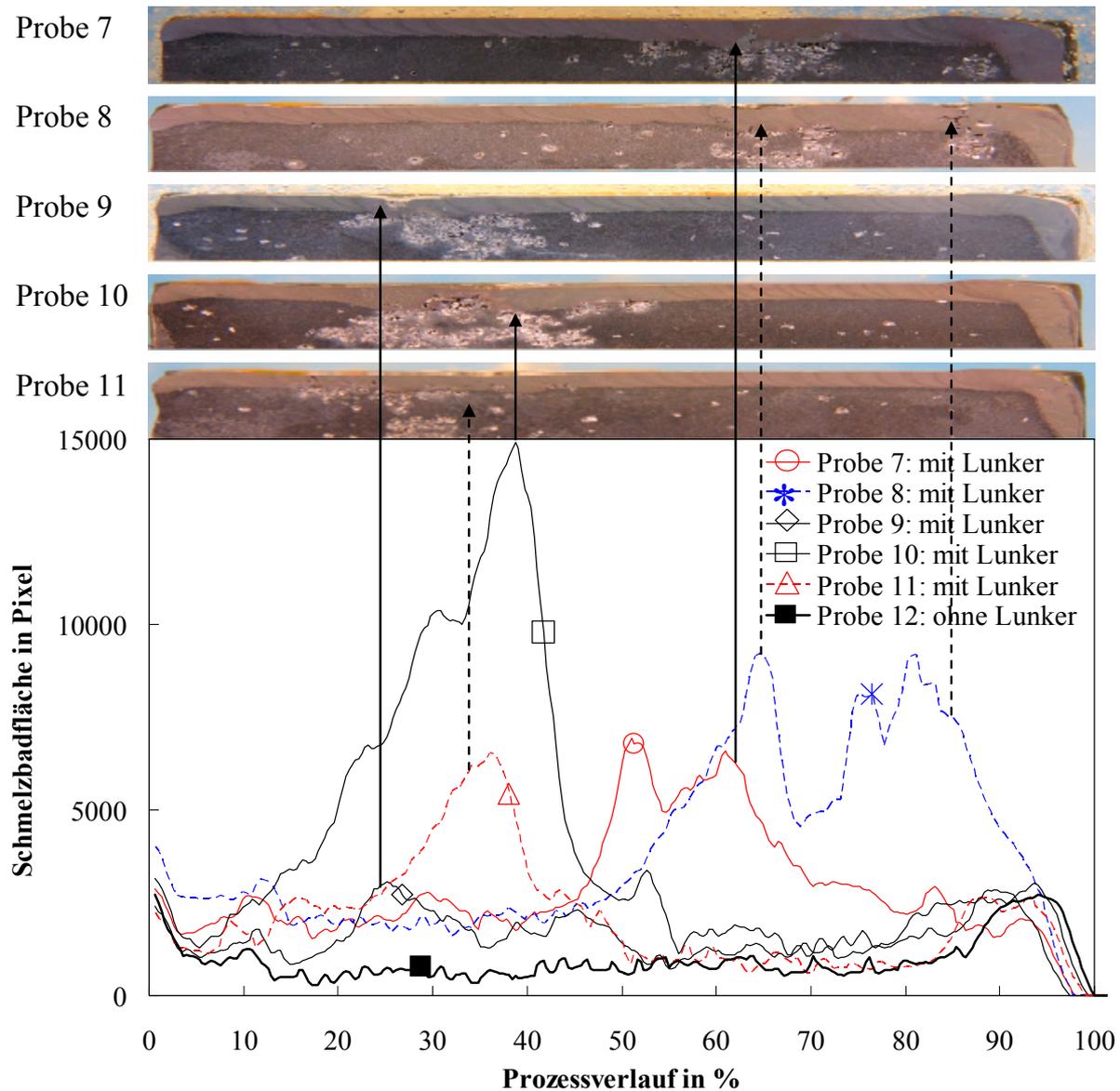


Bild 56: Verlauf der Schmelzbadfläche von Proben mit Lunkern im Vergleich zu einem normalen Umschmelzprozess nach [8]. Die erkannte Position des Lunkers im Prozessverlauf stimmt mit der Position des Lunkers im Längsschliff näherungsweise überein.

Die von Ohmle generierten Messkurven visualisieren wie eindeutig Lunker von Sensoren erfasst und in Messsignale umgewandelt werden können, stellen aber noch keine Bewertung des Umschmelzergebnisses dar. Die für ein Qualitätssicherungssystem zwingend nötige Ergebnisbewertung wird im Folgenden auf Basis der vorliegenden Messdaten entwickelt.

Eine simple Methode zur Erkennung von Ausschussteilen ist die Festlegung eines Grenzwertes bei dessen Überschreitung durch die Messkurve ein Lunker erkannt wird. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis des Normalbereiches anhand von Referenzversuchen. Erstrebenswert ist das Einlernen des Grenzwertniveaus zu vermeiden und mehr Flexibilität des Indikators bezüglich verschiedener Prozessparameter zu schaffen. Das kann erreicht werden, indem Informationen aus dem Kurvenverlauf genutzt werden, die unabhängig vom Grundniveau sind. Kurveneigenschaften wie Steigungen oder Standardabweichungen sollten Lunker identifizieren können. Anhand der vorliegenden Messkurven kann aufgrund der restlichen Signalschwankungen dennoch keine zuverlässige Lunkeridentifizierung mittels der Steigung oder Standardabweichung der Signalkurve nachgewiesen werden.

Eine Methode, welche die nötige Zuverlässigkeit erbringt und vom Signalniveau unabhängig bewertet, hat einen konstanten Signalverlauf, abgesehen vom Lunkerbereich, als Voraussetzung. Der konstante Signalverlauf ermöglicht die Ermittlung des Größenniveaus der Schmelzbadfläche auf Basis der Mittelwertbildung über den gesamten Umschmelzprozess. In einem zweiten Schritt wird zu dem Mittelwert ein Toleranzbereich addiert, um normale Prozessschwankungen nicht als Fehler zu werten. Verlässt ein Signalverlauf im Bereich des Lunkers den Toleranzbereich mit erhöhtem Signalwert, wird ein Lunker erkannt. Bild 57 zeigt wie auf diese Weise verschieden große Lunker detektiert werden. Der Anteil der erhöhten Schmelzbadfläche des Lunkers zum restlichen Prozessverlauf erhöht den Mittelwert nur auf einen Wert zwischen Schmelzbadflächenmaximum und normaler Schmelzbadfläche. Die maximale Schmelzbadfläche im Lunkerbereich ist damit stets größer als der Mittelwert. Die Messschärfe des Indikators hängt vom Toleranzbereich oberhalb der Mittelwertkurve ab. Ein Toleranzbereich unterhalb der Mittelwertkurve ist zur Lunkererkennung nicht nötig, da ein Lunker nie eine verringerte Schmelzbadfläche erzeugt. Die unterschiedlichen Höhenniveaus der Signalverläufe außerhalb des Lunkerbereichs der Proben aus Bild 57 stehen in keinem Zusammenhang zum Lunker der jeweiligen Proben, sondern sind der Übersichtlichkeit nach so aufgetragen. Weiterhin sollen die unterschiedlichen Niveaus die Flexibilität des Indikators bezüglich unterschiedlicher Prozesszustände verdeutlichen.

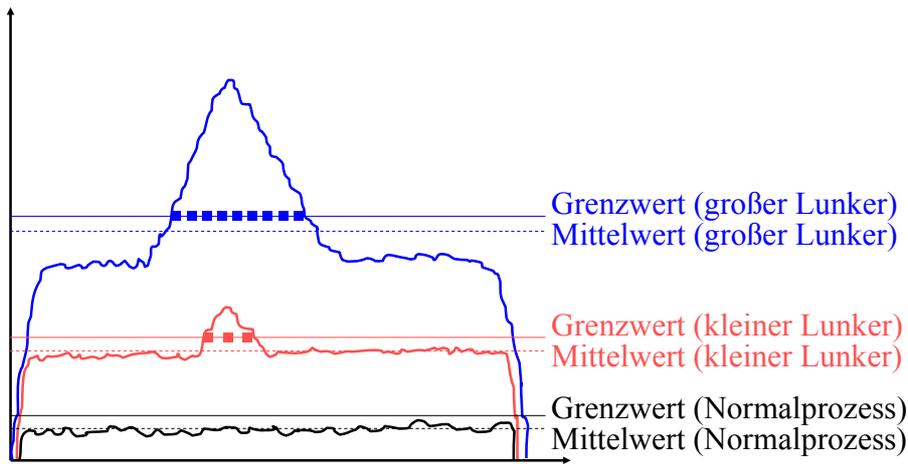


Bild 57: Prinzip der Lunkerdiagnose bei einem Normalprozess (unten), einem kleinen Lunker (Mitte) und einem großen Lunker (oben).

Diese Vorgehensweise angewandt auf die Messdaten aus Bild 56 ergibt eine Lunkererkennung, die zuverlässig Lunker von Umschmelzspuren ohne Lunker unterscheidet. Bild 58 zeigt die Erkennung der Lunker samt ihrer Position in Korrelation zu den Querschleifen. Existiert eine Markierung im Prozessverlauf des Sensorsignals der jeweiligen Probe, so wurde ein Lunker erkannt. Zur Überprüfung der Trennschärfe des Indikators wurden mehrere Prozessverläufe analysiert und in Bild 58 dargestellt, die in Bild 56 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgetragen sind. Die Lunkererkennung korreliert mit wenigen Fehlinterpretationen am Prozessbeginn und Prozessende eindeutig mit den umgeschmolzenen Lunkern der Längsschleife.

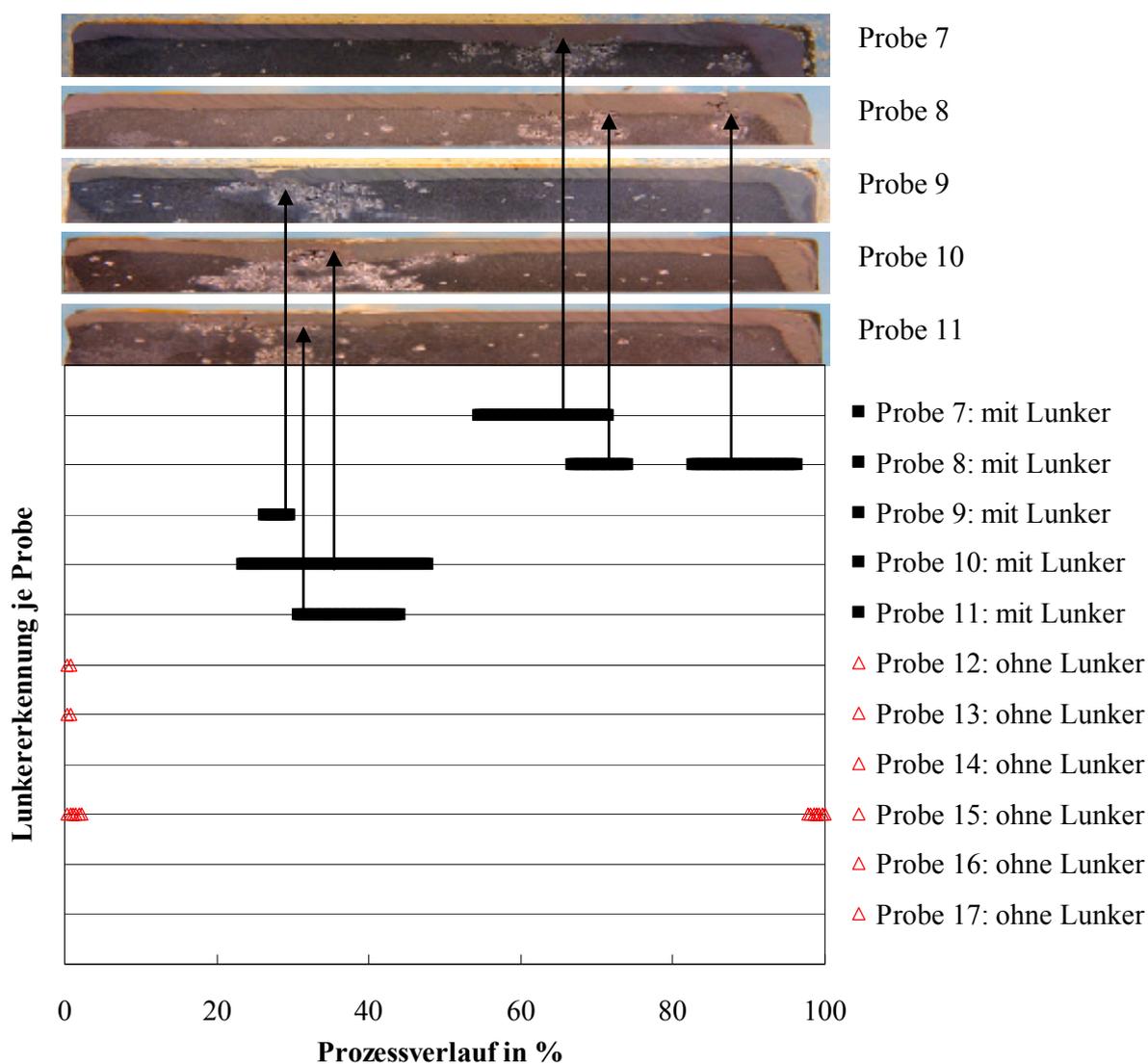


Bild 58: Bewertung der Prozessemissionen bezüglich eines vorliegenden Lunkers. Erkannte Lunker werden an der jeweiligen Position im Prozessverlauf der entsprechenden Probe markiert und mit der Position des Lunkers im Längsschliff verglichen.

#### 4.1.7 Erkennung der falschen Bearbeitungsposition

Ein Online-Prozessdiagnosesystem sollte zur Kontrolle der Bearbeitungsposition nicht die erste Wahl sein. Vorlaufende Sensorik, wie ein Triangulationssensor, ist mittels einer Orientierungskontur in der Lage, die Bearbeitungsposition nicht nur zu überwachen sondern zusätzlich zu regeln. Vorlaufenden Sensoren sind oft nur

eingeschränkt richtungsunabhängig und stellen eine zusätzliche Störkontur in der Anlage dar. Bestehen oben genannte technische Hindernisse oder liegt ein stabiler Prozess vor, bei dem das Risiko einer falschen Positionierung sehr gering ist und deshalb nur überwacht werden muss, kann unter Beachtung weniger Einschränkungen auf ein kamerabasiertes Online-Prozessdiagnosesystem zurückgegriffen werden. Auf die Auswertung der integralen Sensoren wurde verzichtet, da die Aufgabe, Konturen zu erkennen und deren Position und Verlauf zu analysieren, eher die Eignung eines orts aufgelösten Sensors, einer Kamera trifft als z.B. die eines Temperatursensors. Die Kontrolle der Bearbeitungsposition kann von einem kamerabasierten System übernommen werden wenn:

- eine Referenzposition in Form einer Kontur den Bildschirmausschnitt während der Bearbeitung passiert, welche durch ihre Position auf dem Chip als Bezug zum Laserstrahlmittelpunkt auf der Werkstückoberfläche genutzt werden kann. Dies gilt für alle Systeme, aber darauf spezialisierte Systeme können an diese Aufgabe angepasst werden. Bei Online-Prozessüberwachungssystemen wird sowohl der Bildausschnitt als auch die Belichtungszeit auf die Prozessemissionen aus der Wechselwirkungszone angepasst, wodurch der Bildausschnitt im Allgemeinen klein und die Helligkeit gering ist.
- die Kontur während des Umschmelzvorganges, trotz der intensiven Emissionen aus der Wechselwirkungszone, noch erkennbar und vom Bildverarbeitungssystem eindeutig auswertbar ist.
- die Kontur eine scharfe Kante hat, deren Position analysiert wird oder die Kontur ein immer gleiches Erscheinungsbild hat auf welches die Prozessdiagnose parametrisiert wird.

Durchlaufen solche Konturen das Kamerabild, können sie durch eine Art Füllstandanzeiger in Form eines AOI (area of interest) erfasst und durch den Grad des Füllstandes in ihrer Position analysiert werden. Im vorliegenden Fall aus Bild 59 werden kreisförmige Vertiefungen als Konturen umgeschmolzen. Im Kamerabild bewegen sich die Konturen horizontal durch das Bild, wodurch als Füllstandanzeiger ein hohes Rechteck mit geringer Pixelbreite innerhalb der hellen Sichelfläche positioniert wird. Passiert nun die kreisförmige Vertiefung die Wechselwirkungszone, trifft das Laserlicht auf keine absorbierende Oberfläche und ein Teil der Sichel emittiert nicht, siehe Bild 59. Der Füllstandanzeiger, das AOI ist nicht mehr vollständig gefüllt mit hellen Pixeln und das minimale Füllstandniveau gibt die Position der Kontur in einer Achse an. Die zeitliche Auswertung der Füllstandanzeige

ergibt den Zeitpunkt des Passierens der Kontur, also die Position der Kontur in Vorschubrichtung. Die geringe aber vorhandene Breite des AOI soll die Störanfälligkeit z.B. auf kleine Coatingdefekte auffangen, muss aber bei der Kalibrierung von Pixel zu Millimetern beachtet werden. Bild 59 zeigt drei Proben, von denen zwei eine kreisförmige Kontur umgeschmolzen haben. Durch den erreichten Minimalwert der Füllstandkontrolle wurde die Position der Kontur 20 relativ zur Kontur 19 bestimmt und die Abweichung auf Millimeter kalibriert.

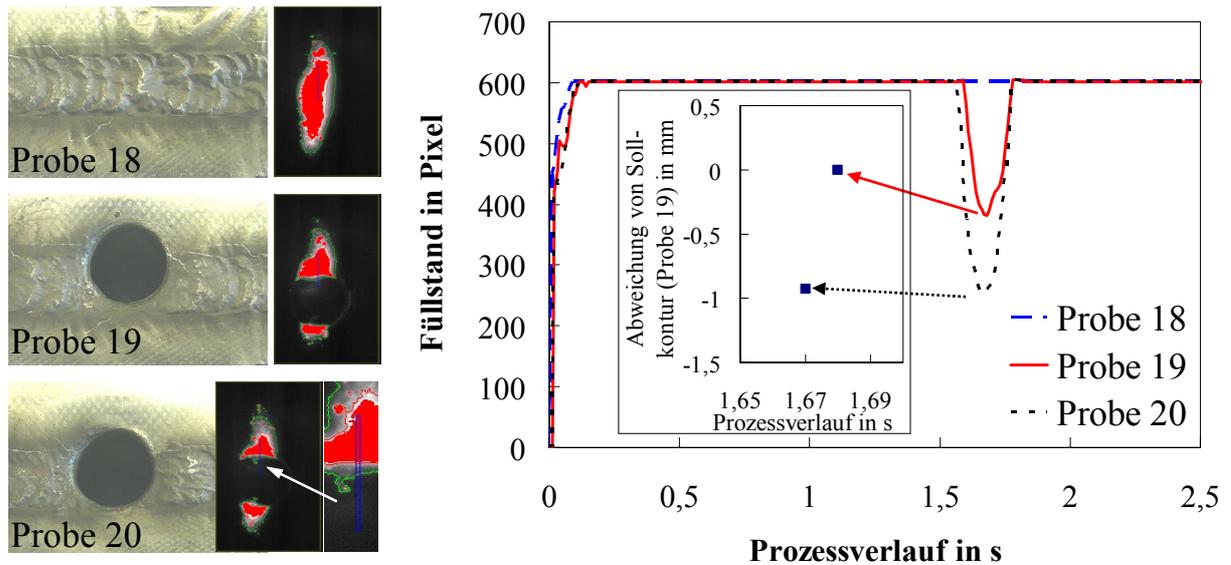


Bild 59: Diagnose der Umschmelzposition:

Probe 18: keine Kontur

Probe 19: Kontur an der Sollposition

Probe 20: Kontur von Sollposition um 1mm verschoben.

## 4.2 Analyse des Beschichtungsvorganges

Laserbeschichtungsvorgänge erzeugen durch das eingebrachte und aufgeschmolzene Pulver werkstoff- und prozessabhängige Emissionen. Durch die aufgetragene Schicht müssen andere Qualitätsgrößen überwacht werden als beim Laserstrahlumschmelzen. Die Analyse der Emissionen beim Laserstrahlbeschichten und die Nutzung von Indikatoren zur Erkennung von Ergebnisgrößen, wird im Folgenden anhand eines Emissionsmodells und Fehlererkennungsroutinen vorgestellt.

### 4.2.1 Modell zum Laserstrahlbeschichten

Zur Ableitung von Messstrategien, die in einem Qualitätssicherungssystem zu einer Prozess- und Ergebnisbewertung führen, müssen die Vorgänge im Beschichtungsprozess und die damit verbundenen Emissionen für die Sensorik bekannt sein. Bekannte Zusammenhänge aus Kapitel 2.1.2 und eigens beobachtete Wechselwirkungen werden zum nachfolgend beschriebenen Modell vereinigt. Das Modell wird im Folgenden anhand von drei Zonen beschrieben, die im Bild 60 dargestellt sind.

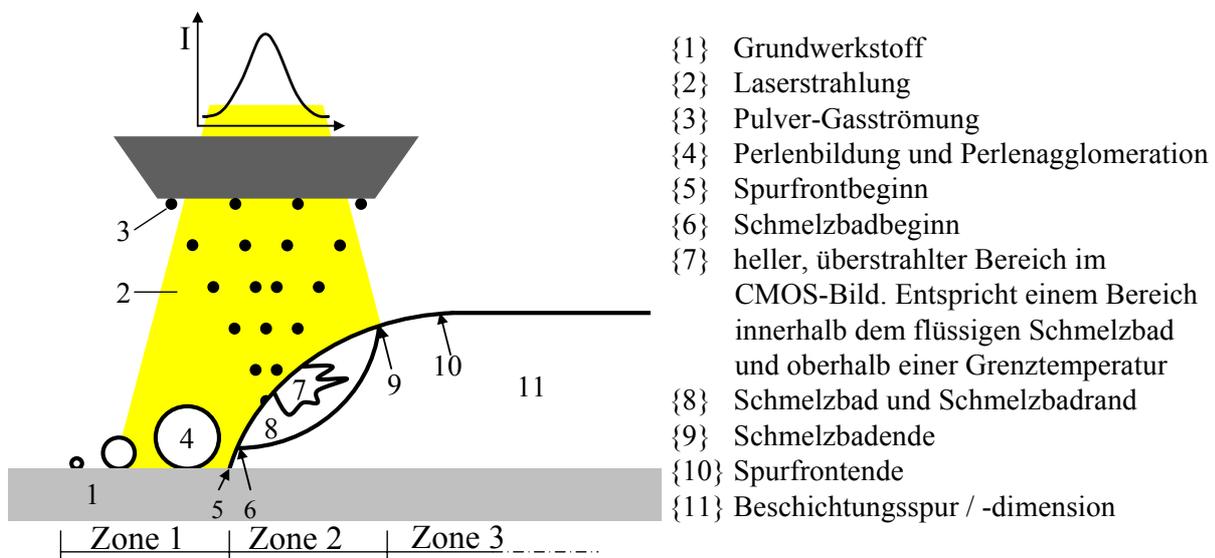


Bild 60: Prinzipskizze des Beschichtungsprozesses.

Um die Vorgänge beim Beschichten zu untersuchen und um Rückschlüsse auf den Einfluss von Prozessparametern auf die Ergebnisgrößen treffen zu können, wurde der Prozess mit verschiedenen Sensoren beobachtet. Zum einen wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera mit (Bild 61a) und ohne (Bild 61b) Beleuchtungslaser und einer Bildwiederholrate von 4500Hz aus zwei verschiedenen Perspektiven eingesetzt. Die Optik der Hochgeschwindigkeitskamera wurde mit einem Interferenzfilter (808nm) auf die Wellenlänge des Beleuchtungslasers abgestimmt. Zum anderen zeigt Bild 61c die Perspektive einer koaxial zur Laserstrahlung schauenden CMOS-Kamera, die mit 200Hz Bildwiederholrate zur Entwicklung von Prozessverständnis genutzt und zur späteren Online-Prozessüberwachung vorgesehen ist.

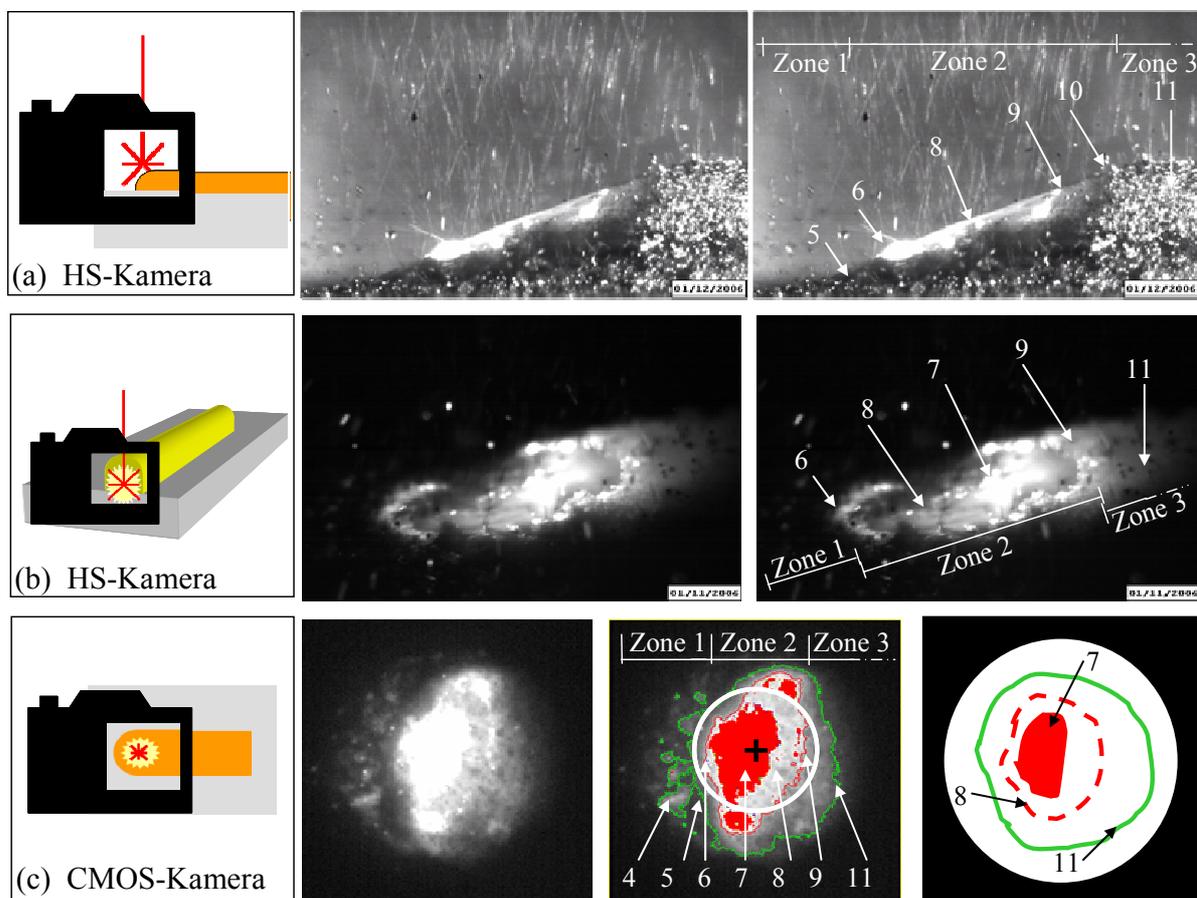


Bild 61: (links) Aufnahmeperspektive, (Mitte) repräsentative Momentaufnahme und (rechts) Einteilung des Beschichtungsprozesses in die drei Zonen sowie Darstellung markanter Punkte nach Bild 60.

Die **Zone 1** befindet sich im Vorlauf zum Schmelzbad. In ihr finden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen und Wärmeleitungsvorgänge statt, die zum Aufwärmen von Grund- und Beschichtungswerkstoff bis hin zur Tropfenbildung des

Beschichtungswerkstoffes {4} führen. Die anschließende **Zone 2** beinhaltet das eigentliche Schmelzbad. Zur Ausbildung eines Schmelzbades muss eine Mindestmenge an Pulver und ein korrektes Verhältnis zwischen Pulvermenge und Laserleistung vorhanden sein. Bei Annahme eines Beschichtungsvorganges mit einer gaußförmigen oder gaußähnlichen Intensitätsverteilung der Laserstrahlung entsteht innerhalb der Wechselwirkungszone mit der steigenden Leistungsdichte zum Laserstrahlmittelpunkt ein flüssiges Schmelzbad. Aus der seitlichen Kameraperspektive ist der Schmelzbadbeginn {6} und das Schmelzbadende {9} und aus der Draufsicht ein kompletter Schmelzbadrand {8} zu erkennen. Zum Zentrum des Schmelzbades hin, das auch dem Zentrum der Intensitätsverteilung des Lasers entspricht, steigt die Temperatur weiter an, wodurch sich ein Temperaturgradient innerhalb des Schmelzbades bildet, der von orts aufgelösten Sensoren in Form des hellen/heißen Bereiches {7} erkannt wird. In **Zone 3** findet wenig bis keine Strahl-Stoff-Wechselwirkung mehr statt. Der aufbeschichtete Werkstoff kühlt in Form der Beschichtungsspur {11} vorwiegend durch Wärmeleitung in den verhältnismäßig großen Grundwerkstoff ab. Der gesamte Beschichtungsprozess folgt dabei der Energiebilanz nach Gl.4.15.  $Q_B$  ist dabei die eingekoppelte Laserleistung die als Wärme für den Beschichtungsprozess zu Verfügung steht. Demgegenüber stehen die Verluste durch Konvektion  $Q_K$ , Wärmeleitung  $Q_L$ , Strahlung  $Q_E$  und die Energie die zum Aufschmelzen des Pulvers  $Q_P$  benötigt wird.

$$Q_B = Q_K + Q_L + Q_E + Q_P \quad (4.15)$$

#### 4.2.1.1 Zone 1

Die Zone 1 ist der Bereich, der im vorlaufenden Randbereich des Lasers mit geringer Intensität bestrahlt wird, in dem Pulver in geringen Mengen vorliegt und der durch Wärmeleitung im Grundwerkstoff vorgewärmt wird. Zum Ausbilden eines Schmelzbades ist die notwendige Pulverenergiedichte oder Pulverdichte noch nicht erreicht.

#### Geringe Pulverenergiedichte:

Die Energiedichte ist zu gering, um das geschmolzene Pulver über die kritische Temperatur nach [92] zu erhitzen und damit die Oberflächenspannung so weit zu senken, dass eine Benetzung erfolgen kann. Ist die Laserleistung konstant, steht für

den Beschichtungsprozess eine konstante Wärmemenge  $Q_B$  zur Verfügung und damit ist auch näherungsweise die Verlustenergie und Pulverenergie  $Q_P$  konstant. Für den Fall einer konstanten Pulverenergie und einem steigenden Pulvermassenstrom ( $m_p \uparrow$ ) folgt nach Gl.4.16, dass die Schmelzbadtemperatur ( $T_B \downarrow$ ) fällt und beim Unterschreiten der kritischen Temperatur keine Benetzung sondern nur noch Tropfenbildung möglich ist.

$$\begin{aligned} Q_B &= \textit{konstant} \\ Q_P &= c_p \cdot m_p [(T_B - T_0) + h_p] = \textit{konstant} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Um die Zusammenhänge nachzustellen, wurde auf dem Grundwerkstoff eine hinreichende Menge Beschichtungspulver von  $0,017\text{gr}/\text{mm}^2$  auf den Grundwerkstoff vordeponiert und mit Laserleistung von  $1,5\text{kW}$  über den Zeitraum einer Sekunde bestrahlt (siehe Bild 62). Mehrere Effekte sind erkennbar:

- schnelle Tropfenbildung und Tropfenagglomeration (siehe Bild 62 a, b, c). Tropfen mit einem Volumen von ca.  $1,1\text{mm}^3$  werden in 30ms und Tropfen mit ca.  $11,5\text{mm}^3$  in 90ms gebildet.
- durch das Aufnehmen von neuem, kaltem Pulvermaterial senkt sich die Tropfentemperatur lokal ab, erkennbar an den dunklen Bereichen im Tropfen (siehe Bild 62d). Diese lokalen, dunklen Bereiche sind nicht durch winkelabhängige Emissionsgrade zu begründen, weil in die gesamte Kugel aus Bild 62e von oben gesehen gleich intensiv strahlt.
- das Maximum der Tropfengröße wird durch die Leistungsdichte begrenzt. Liegt unbegrenzt Pulver vor, wächst der Tropfen durch ständige Agglomeration immer weiter, bis Abschattungseffekte der entstandenen Kugel nur noch die Strahlintensität im Randbereich der Laserstrahlung durchlässt, die zum Aufschmelzen nicht mehr ausreicht (siehe Bild 62e). Einzige Möglichkeit der Kugel sich weiter zu vergrößern ist die Aufnahme von Pulver im Auflagepunkt. Die CMOS-Aufnahmen zeigen dieses Verhalten durch eine reduzierte aber vorhandene Wachstumsrate der Kugel. Ergebnis eines solchen Prozesszustandes ist eine Kugel, die vollständig aus Beschichtungswerkstoff besteht und von der Laserstrahlung nicht stark genug erhitzt wird, um eine Reduktion der Oberflächenspannung bis zu einer Benetzung des Grundwerkstoffes zu erfahren (siehe Bild 62f).

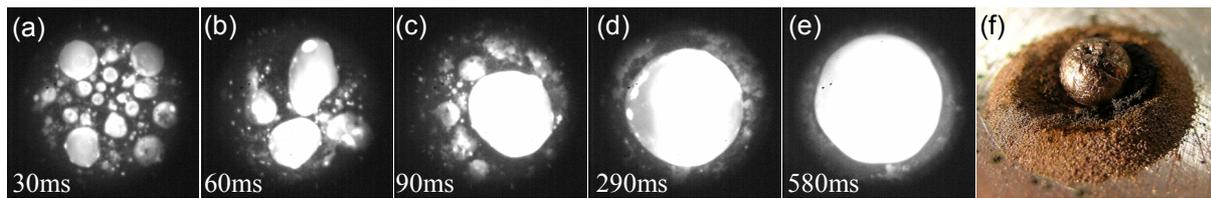


Bild 62: Momentaufnahmen der Prozessüberwachungskamera: Tropfenbildung und Tropfenagglomeration bei geringer Pulverenergiedichte bei (a) 30ms, (b) 60ms, (c) 90ms, (d) 290ms und (e) 580ms nach Einschalten der Laserstrahlung. (f) Foto der agglomerierten Kugel im nicht aufgeschmolzenen Beschichtungspulver nach dem Prozess.

Beim realen Beschichtungsprozess ist eine ähnliche Tropfenbildung und Tropfenagglomeration erkennbar (siehe Bild 63). Zusätzlich zur steigenden Tropfentemperatur und damit sinkender Oberflächenspannung begünstigt hier die Pulver-Gas-Strömung den Benetzungsprozess. Die von der Laserseite wirkende Pulverströmung übt eine Kraft auf die gebildeten Beschichtungstropfen in Richtung Grundwerkstoff aus. Dadurch wird der Kontakt zwischen Tropfen und Grundwerkstoff verbessert. Im idealen Fall einer Deformation der Kugel kommt es sogar zu einer Vergrößerung der Kontaktstelle. Einfliegende Pulverpartikel und eine inhomogene Gasströmung destabilisieren partiell die Oberflächenspannung. Dies zieht den Verlust der Kugelform und eine Benetzung der Oberfläche nach sich.

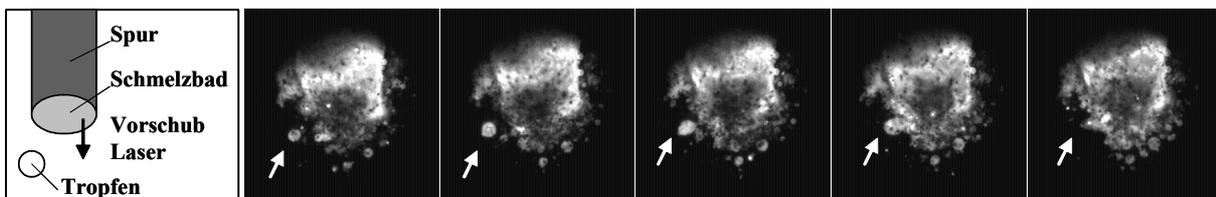


Bild 63: Momentaufnahmen der CMOS-Kamera von einem Beschichtungstropfen, der während des Beschichtungsvorganges heißer wird, durch Agglomeration wächst und schließlich den Grundwerkstoff benetzt und Teil des Schmelzbades wird.

Für die Zone 1 des Beschichtungsprozesses hat die Pulverenergiedichte eine charakteristische Tropfenbildung und eine variable Schmelzbadentwicklung zur Folge. Bild 64 zeigt den Spurfrontbeginn {5} bei konstantem Pulvermassenstrom in Abhängigkeit der eingestellten Laserleistung. Der Beschichtungsvorgang, Probe A mit 1,5kW Laserleistung, entwickelt erst in der Mitte des Laserstrahls, wo die Leistungsdichte am größten ist, den Spurfrontbeginn. Mit zunehmender Laserleistung wandert

der Spurfrontbeginn in Vorlaufrichtung. Für die höchste Laserleistung von 4,0kW ist ein Vorwärmeeffekt erkennbar. Der Spurfrontbeginn liegt hier außerhalb des bestrahlten Bereiches. Dies lässt den Schluss zu, dass die Wärmeleitung im Grundwerkstoff zusammen mit heißen einfliegenden Partikeln zur Benetzung führt.

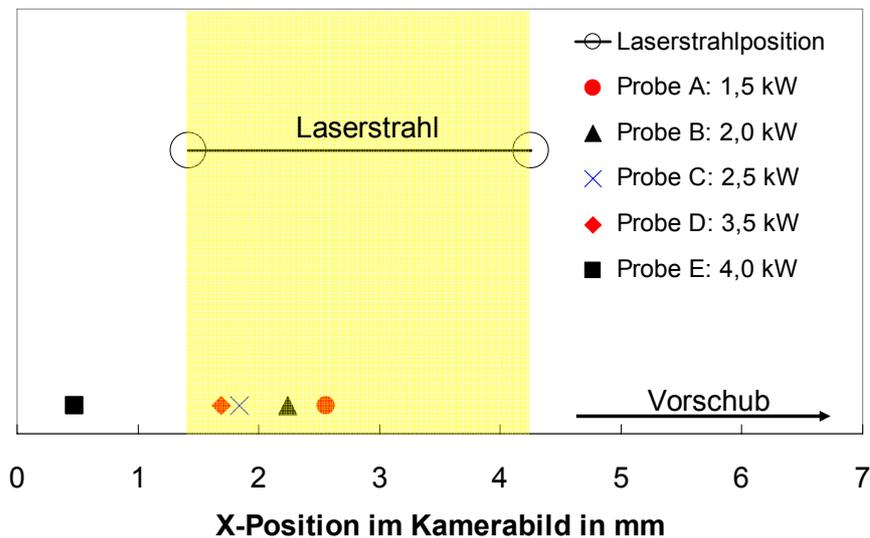


Bild 64 Analyse der seitlich gefilmten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zum Spurfrontbeginn in Abhängigkeit der Laserleistung.

### Geringe Pulverdichte

Eine geringe Pulverdichte bedeutet, dass nur wenige Pulverpartikel einen unerheblichen Anteil der Laserstrahlung absorbieren und kaum Beschichtungsmasse zur Tropfen- und Schmelzbadbildung zur Verfügung steht. Bild 65 verdeutlicht den Zusammenhang anhand von auf Aluminium vordeponiertem Beschichtungspulver der Masse  $0,0014\text{g/mm}^2$ , welches mit einer Laserleistung von 1kW und in einer Zeit von einer Sekunde bestrahlt wird.

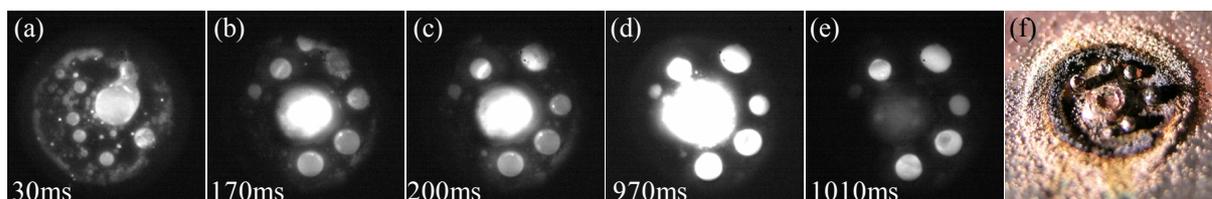


Bild 65: Momentaufnahmen der Prozessüberwachungskamera: Tropfenbildung und Tropfenagglomeration bei geringer Pulverdichte bei (a) 30ms, (b) 170ms, (c) 200ms, (d) 970ms nach Einschalten der Laserstrahlung und (e) 10ms nach dem Ausschalten des Lasers. (f) Foto der agglomerierten Kugeln auf dem Grundwerkstoff mit dem benetzten Bereich im Zentrum.

Folgende Effekte sind dabei zu erkennen:

- die Tropfenbildung erfolgt langsamer als bei ausreichend vorliegendem Pulver. Um Tropfen der Größe von ca.  $0,3\text{mm}^3$  zu erhalten sind 170ms nötig im Gegensatz zu weniger als 30ms unter den Bedingungen von Bild 62. Das Agglomerieren verläuft aufgrund der größeren Pulver- und Tropfenabstände durch die verringerte Partikel- und Tropfenanzahl pro Flächeneinheit analog zur Tropfenbildung langsamer. Pulverpartikel in größerer Anzahl, die zwischen Tropfen liegen, eine Art Pulverbrücke, lassen die Tropfen wachsen und fördern das Agglomerieren. Das Erwärmen der Randbereiche erreicht im vorliegenden Fall nach Bild 65 mit Hilfe von Pulverbrücken zwischen den Tropfen ein Agglomerieren bis ca. 200ms nach Laserstart. Wenn keine Pulverbrücken, die zur Agglomeration beitragen könnten, mehr vorhanden sind und die Entfernung zwischen den Tropfen zum direkten Vereinigen zu groß ist, ist ein Gleichgewichtszustand in der Tropfenbildung erreicht und es findet kein weiteres Agglomerieren mehr statt.
- die maximale Tropfengröße ist klein. Die Tropfen agglomerieren abhängig von den Umgebungsbedingungen zu einer maximalen Tropfengröße, die geringer als bei einer ausreichenden Pulverdichte ist. Da die vordeponierte Partikelanzahl überall gleich ist, aber die Tropfengröße unterschiedlich ist, wird davon ausgegangen, dass die Tropfengröße außerhalb des Strahlzentrums aus zufälligen Agglomerationsvorgängen resultiert.
- im Laserstrahlmittelpunkt befindet sich der größte Beschichtungstropfen, weil hier aufgrund der Intensitätsverteilung als erstes die Schmelztemperatur erreicht wird und alles erreichbare Pulver der Umgebung vereinnahmt wird.
- ab dem Gleichgewichtszustand, bei Bild 65 nach 200ms, wird keine Laserleistung mehr für das Aufschmelzen von Beschichtungspulver verwendet, so dass die absorbierte Laserleistung zum Aufheizen der Tropfen genutzt wird. Der Aufheizvorgang folgt wieder der Intensitätsverteilung des Lasers, abgebildet in der Sequenz von Bild 65. In den Randbereichen kommt es zur Tropfenbildung (0-200ms) und zur Tropfenerwärmung (200-1000ms), während im Mittelbereich der Laserstrahlung aufgrund der höheren Leistungsdichte und Tropfentemperatur ein Benetzungsvorgang stattfindet. Indiz für die Benetzung und den damit verbundenen metallurgischen Verbund ist die rasante Abkühlung des Tropfens im Zentrum durch Wärmeleitungseffekte in den Grundwerkstoff. Zu sehen ist die rasche Abkühlung in Bild 65e, unmittelbar nach dem

Abschalten des Lasers. Das benetzte Zentrum ist dunkel während die heißen Tropfen noch hell strahlen.

Beim Laserstrahlbeschichten sind diese Vorgänge trotz zusätzlicher Einflüsse von Vorschubgeschwindigkeit sowie Pulvergasströmung erkennbar. Durch die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen aus der seitlichen Perspektive konnte ermittelt werden, dass mit der Erhöhung der zugeführten Pulvermasse der Spurfrontbeginn immer weiter in Vorlaufrichtung wandert. Dieser Effekt hält bis zu einem Grenzwert an, bei dem so viel Pulvermasse vorliegt, dass die Laserenergie zum Erwärmen und Aufschmelzen wieder mehr Zeit benötigt und der Spurfrontbeginn wieder nach hinten wandert. Bild 66 enthält zusätzlich zur X-Position des Spurfrontbeginns auch noch dessen Y-Koordinate um zu zeigen, dass bei hohem Pulverstrom der Spurfrontbeginn aufgrund der üppig vorhandenen Pulvermenge zusätzlich wenige Zehntel Millimeter nach oben wandert.

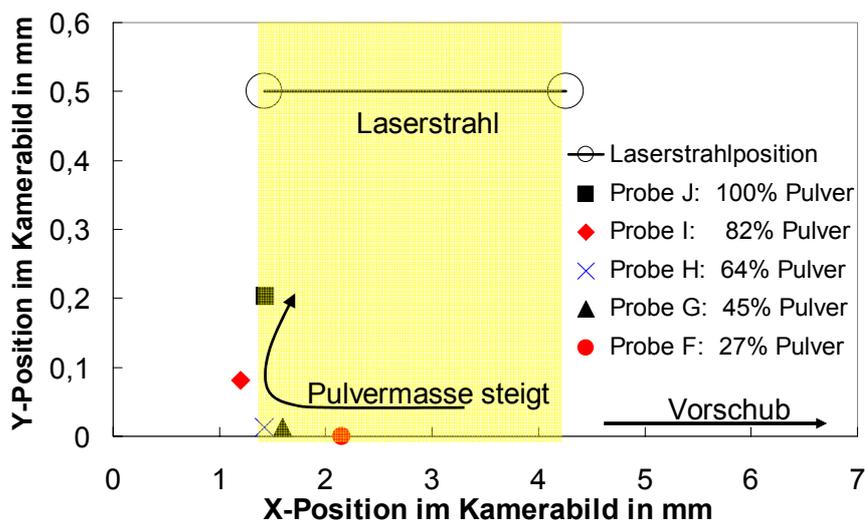


Bild 66: Analyse der seitlich gefilmten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zum Spurfrontbeginn in Abhängigkeit des Pulvermassenstroms.

#### 4.2.1.2 Zone 2

Die Zone 2, das eigentliche Schmelzbad, stellt eine Vielzahl an Informationen zur Verfügung, die zur Online-Prozessüberwachung verwendet werden können. Dazu zählen die Eigenschaften von Schmelzbadbereichen, Helligkeitsverteilungen im Schmelzbad, Schmelzbadströmungen und der Neigungswinkel des Schmelzbades.

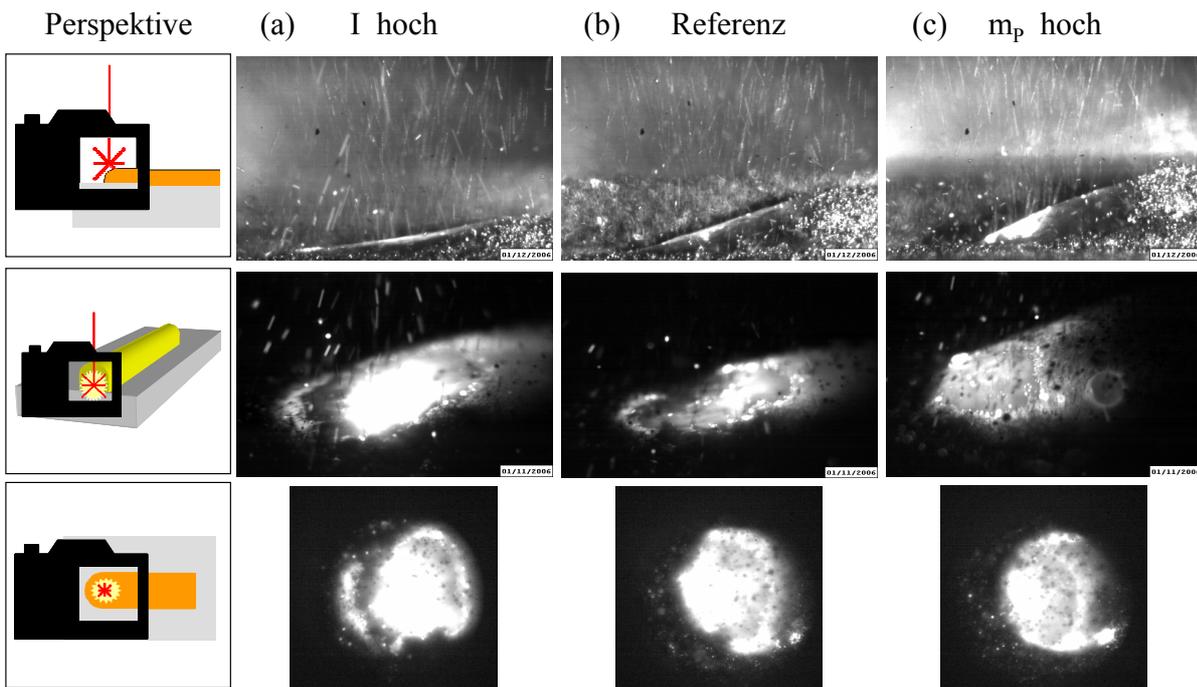


Bild 67: Momentaufnahmen der Hochgeschwindigkeits- und Prozessüberwachungskamera aus den drei Perspektiven von Bild 61 bei (b) normalen Prozessparametern, (a) hoher Laserleistung und (c) hohem Pulvermassestrom.

Bei der Einteilung und Erkennung der **Schmelzbadbereiche** ist, speziell bei den Bildern der Prozessdiagnosekamera, auffällig deutlich der Übergang zum flüssigen Schmelzbad zu sehen. Der helle Saum {8} aus Bild 61, der das Schmelzbad am Außenbereich einkreist, muss seine Ursache in einem höheren Emissionsfaktor bei gleicher Temperatur zum Schmelzbad, in einer höheren Temperatur bei gleichem Emissionskoeffizient zum Schmelzbadaußenbereich oder einer Kombination von beiden haben. Ein Unterschied im Emissionskoeffizient kann durch die zwei verschiedenen Phasen fest und flüssig an der Phasengrenzfläche begründet werden. Zusätzlich bildet die gerade erstarrte Schmelzbadkante einen Wulst, der aufgrund seiner Form und der winkelabhängigen Emissivität nach Fresnel im Brewstermaximum bzw. zumindest in einem besseren Brewsterwinkel als das Schmelzbad zum CMOS-Chip steht. Dies steht nicht im Widerspruch zur Aussage aus Kapitel 4.2.1.1, da hier aufgrund der Aufmischung eine Mischung aus Beschichtungswerkstoff und dem Grundwerkstoff vorliegt und Aluminium bekanntlich winkelabhängig emittiert.

Bei der Analyse der **Helligkeitsverteilung** über das gesamte Bild fällt der helle Bereich {7} im Zentrum des Schmelzbades auf. Das Schmelzbad hat, da innerhalb des flüssigen Schmelzbades von einem annähernd konstanten Emissionskoeffizient

auszugehen ist, eine zum Zentrum hin ansteigende Temperatur. Aufnahmen von Laserbeschichtungsvorgängen mit gleichen Versuchsparametern und unterschiedlichen Belichtungszeiten des CMOS-Chips haben gezeigt, dass innerhalb des hellen/heißen Bereiches weiterhin ein Temperaturgradient mit steigender Tendenz zum Zentrum vorliegt. Die Belichtungszeit, die als Kompromiss für die gesamte Wechselwirkungszone gewählt wird, verursacht eine Helligkeitssättigung ab einer bestimmten Isotherme im Schmelzbad, wodurch der helle/heiße Bereich aus gesättigten Pixeln besteht und nicht mehr weiter aufgelöst wird. Dieser helle/heiße Bereich ist abhängig von den Versuchsbedingungen entsprechend ausgeprägt. Die Ausprägung des Schmelzbades lässt sich in den Abhängigkeiten der vereinfachten Gleichung für Energiebilanz wiedergegeben.

Nach Gleichung 2.33

$$P = P_S + P_R + P_B \quad (2.33)$$

und einem direkten Zusammenhang zwischen eingebrachter Laserstrahlung und der Wärmemenge die für den Beschichtungsprozess zur Verfügung steht lassen sich folgende Zusammenhänge ableiten:

$$P_B \sim Q_B \quad (4.17)$$

$$P \uparrow \Rightarrow Q_B \uparrow \quad (4.18)$$

$$P \downarrow \Rightarrow Q_B \downarrow \quad (4.19)$$

Vergleicht man zwei Beschichtungsvorgänge mit unterschiedlichen Laserleistungen, wie das in Bild 67 (a) und (b) der Fall ist, ergibt sich für Gleichung Gl.4.18 folgender prinzipieller Zusammenhang wenn die Laserleistung erhöht wird:

$$Q_B \uparrow = Q_K \uparrow + Q_L \uparrow + Q_E \uparrow + Q_P \uparrow \quad (4.20)$$

Fasst man die Verluste zu einer Gesamtverlustmenge  $Q_{\text{Verlust}}$  zusammen und ersetzt  $Q_p$  durch dessen physikalischen Größen, erhält man bei steigender Laserleistung:

$$Q_B \uparrow = Q_{\text{Verluste}} \uparrow + \{\eta_P \cdot m_P \cdot [c_P \cdot (T_B - T_0) + H_P]\} \uparrow \quad (4.21)$$

Betrachtet man nur die Verhältnisse im Schmelzbad indem man die Verlustleistung außer Acht lässt, erhält man den vereinfachten Zusammenhang zwischen Laserleistung und Schmelzbadtemperatur:

$$Q_P \uparrow \sim \eta_P \cdot m_P \cdot [c_P \cdot (T_B \uparrow - T_0) + H_P] \quad m_P = \text{konst.} \quad (4.22)$$

Steht mehr Laserleistung zu Verfügung wird das Schmelzbad heißer und damit größer. Ein vergrößertes Schmelzbad ist im Kamerabild direkt messbar, während die Maximaltemperatur nur indirekt erkannt werden kann. Da die Pixel im heißen/hellen Bereich in Sättigung liegen, wird ein Temperaturgradient innerhalb dieser Fläche nicht dargestellt. Eine Flächenzunahme des heißen/hellen Bereiches lässt jedoch auf eine Erhöhung der Maximaltemperatur schließen.

Erhöht man die Pulverfördermenge bei gleichhaltener Laserleistung stellt sich Gl.4.18 folgendermaßen dar, weil mehr Pulver aufgeschmolzen werden muss, wodurch die Schmelzbadtemperatur sinkt und die Verluste geringfügig abnehmen:

$$Q_B = Q_K \downarrow + Q_L \downarrow + Q_E \downarrow + Q_P \uparrow \quad Q_B = \text{konst.} \quad (4.23)$$

Vereinfacht man diesen Zusammenhang analog Gl.4.22 auf die Abhängigkeiten im Schmelzbad ergibt sich:

$$Q_P \uparrow \sim \eta_P \cdot m_P \uparrow \cdot [c_P \cdot (T_B \downarrow - T_0) + H_P] \quad (4.24)$$

Dieser Zusammenhang findet sich auch in den Momentaufnahmen aus Bild 67 (b) und (c) wieder. Folge der steigenden Pulveremasse  $m_P$  ist eine geringere Maximaltemperatur des Schmelzbades und daran gekoppelt ist eine verringerte Ausdehnung des heißen/hellen Bereiches sowie des gesamten Schmelzbades.

Unter Annahme einer gaußähnlichen Abnahme der Strahlungsintensität vom Fokuszentrum zum Rand sollte ein homogener Temperaturgradient vom heißen/hellen Bereich zum Rand vorliegen. Die CMOS Bilder zeigen allerdings einen steilen und radial inhomogenen Temperaturgradient. Diese Tatsache lässt auf den Einfluss von intensiven Wärmeleitungseffekten sowie vor allem auf Schmelzbadströmungen schließen. Für die vorliegende Materialkombination, das Parameterfenster und sonstige Randbedingungen wie Pulver-Gas-Strömung wurden **Schmelzbadströmungen** durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermittelt und im Bild 68 dargestellt. Die Analyse von Hochgeschwindigkeitsfilmen mit 4500 Bilder/s hat ergeben, dass eine Schmelzbadströmung an der Oberfläche zum Schmelzbadmittelpunkt stattfindet. Speziell bei sehr hohen Pulverfördermengen werden erstarrte Beschichtungsreste, die am Rand des Schmelzbades auf der flüssigen Schmelze aufliegen, vom Rand des Schmelzbades nach innen getrieben. Entgegengesetzt drängt eine Kraft die Beschichtungsschollen wieder zurück an den Rand. Zwei verschiedene

Mechanismen, die nachfolgend erklärt werden, beeinflussen in gegensätzlicher Richtung die Ausbildung des Schmelzbades.

Das einfliegende Pulver, das aufgrund seiner Verteilung die höchste Pulveranzahl im Schmelzbadzentrum hat, bewirkt aufgrund der Masse-, Impuls- und Energieerhaltung nach Navier-Stokes eine Schmelzbadströmung im Schmelzbadzentrum vertikal in Richtung Grundwerkstoff. Die heiße Schmelzbadflüssigkeit schmilzt den Grundwerkstoff an, sorgt für die gewollte Aufmischung und verliert dadurch an Temperatur. Von nachfolgender Pulver-Schmelz-Strömung wird dieser Strom vom Grund zu den Rändern getrieben, wo er an die Oberfläche steigt. Diese Strömung erzeugt, durch die Sogwirkung der abtauchenden Pulver-Schmelz-Strömung, eine Wirbelströmung, die eine Oberflächenströmung vom Rand zum Zentrum des Schmelzbades bewirkt.

Das Zurückdrängen der erstarrten Beschichtungsschollen von der Schmelzbadmitte zu den Rändern, wie in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ersichtlich, kann durch den Gasanteil der Pulver-Gasströmung erklärt werden. Während das Pulver im Schmelzbad versinkt, prallt die Gasströmung an der Oberfläche ab und sucht ihren Weg, unter dem Druck der nachfolgenden Gasströmung, an der Schmelzbadoberfläche vom Schmelzbadzentrum aus in alle Richtungen. Dabei drängt sie schwimmende Schollen an den Rand und bewirkt so ein ständig offenes Schmelzbad. Die Schmelzbadströmung aus Bild 68 bewirkt eine konstante Durchmischung der Schmelzbadzone und ein Anschmelzen des Grundwerkstoffes. Dabei verliert die Schmelzbadströmung stetig an Temperatur und kehrt entsprechend erkaltet an die Oberfläche und dort zum Schmelzbadmittelpunkt zurück. Die kalte Strömung zum Schmelzbadmittelpunkt ist zusammen mit der abfallenden Intensitätsverteilung des Lasers eine Ursache für den steilen Temperaturgradient der heißen/hellen Fläche {7} zum umgebenden Schmelzbad.

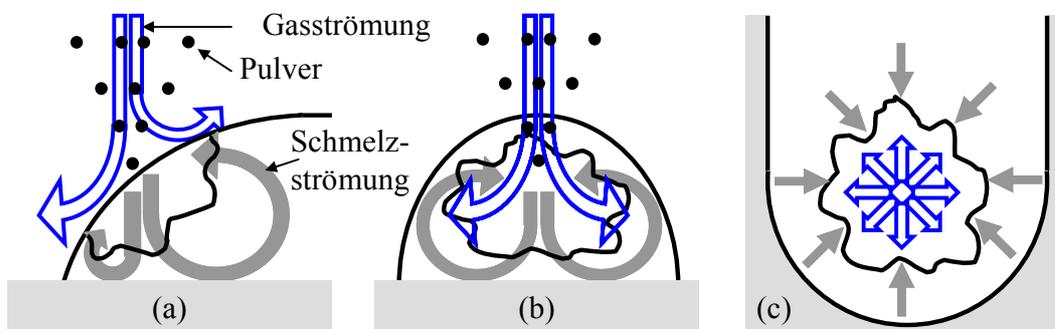


Bild 68: Prinzipbild der Schmelzbad- und Pulver-Gasströmung beim Laserstrahlbeschichten mit koaxialer Pulverzufuhr aus der Perspektive (a) seitlich, (b) von vorne und (c) von oben.

Ein Ansatz, den **Einfluss der Prozessparameter** auf den Spurbildungsprozess, also das Gleichgewicht zwischen Laserleistung, Verlustleistungen und der Energie zum Pulveraufschmelzen, zu analysieren ist die verschiedenen Bereiche der Spurfront und die Schmelzbadneigung innerhalb einer Pulvervariation und einer Leistungsvariation zu vergleichen. Bild 69 und Bild 70 zeigen die Auswertung seitlich aufgenommener Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und geben die Spurfront mit enthaltenem Schmelzbad in seiner horizontalen und vertikalen Position in Bezug zur Laserposition wieder. Die Pulvervariation aus Bild 69 wurde mit einer gleich bleibenden Laserleistung von 3,0kW und bewegter Optik durchgeführt.

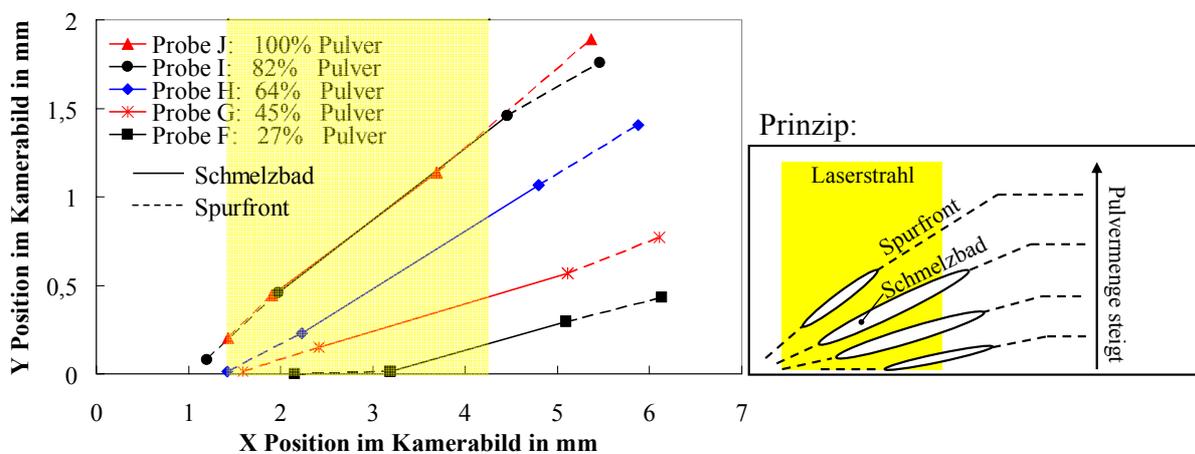


Bild 69: Nachbildung der Spurfront durch seitlich aufgenommene Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Prinzip der Spurfrontneigung und Schmelzbadausbildung bei variablem Pulvermassenstrom.

Eine steigender Pulvermassenstrom hat zur Folge dass,

- der Spurfront- und Schmelzbadbeginn immer früher einsetzt. Beide wandern im Diagramm in Vorlaufrichtung (links). Die steigende Pulverdichte sowohl im koaxialen Einstrahlweg des Lasers, aber vorwiegend auf dem Werkstoff, sorgt für eine erhöhte Absorption der Laserstrahlung. Eine Art Pulverteppich auf dem Grundwerkstoff wirkt wie ein Coating und sorgt mit steigender Pulvermenge früher für Einkopplung.
- die Schmelzbadgröße erst ansteigt, über einen großen Parameterbereich annähernd konstant bleibt und bei hohen Pulverfördermengen wieder abnimmt. Die Ausprägung des Schmelzbades bei großen Pulvermassenströmen nimmt in Vorschubrichtung ab, da die erhöhte Pulvermenge aufgeheizt und auf-

geschmolzen werden muss, wodurch die Schmelzbadtemperatur sinkt. Mit fallender Schmelzbadtemperatur verlagert sich das Schmelzbadende immer weiter in Vorlaufrichtung. Damit verlagert sich das gesamte Schmelzbad mit steigender Pulverzufuhr in Vorlaufrichtung, im Bild 69 nach links, weil das Schmelzbad früher beginnt und auch früher endet.

- die Höhe der beschichteten Spur und die Neigung der Spurfront und des Schmelzbades größer wird, da mehr Pulver in der gleichen Strecke zu einer höheren Spur beschichtet wird.

Bei sehr großen Pulvermassenströmen steigen die Spurhöhe und Schmelzbadneigung weiter an, da die Laserenergie noch ausreicht, um viel Pulver zumindest im Strahlzentrum mit der höchsten Leistungsdichte aufzuschmelzen und zu einer Spur zu verkleben. Die dadurch fallende Schmelzbadausbildung hat eine geringe Beschichtungstiefe, eine niedere Aufmischung sowie eine kleine Beschichtungsbreite zur Folge.

Die steigende Laserleistung bzw. Energiedichte aus Bild 70 hat zur Folge dass,

- der Spurfront- und Schmelzbadbeginn früher einsetzen und damit in Vorlaufrichtung (im Diagramm links) wandern.

Geringe Laserleistungen verzögern die Bildung einer Spurfront, da die Leistungsdichte erst im Bereich des Strahlzentrums bei maximaler Strahlintensität ausreicht, um das Beschichtungspulver zumindest anzuschmelzen. Die Laserenergie reicht dabei nicht für die Entwicklung eines Schmelzbades aus, wodurch keine Schmelzbadströmung ausgebildet wird, die zum Anschmelzen des Grundwerkstoffes führt.

Hohe Laserleistungen und damit verbundene Vorwärmeeffekte durch das heiße Schmelzbad bringen die Mindestenergie zum Aufschmelzen des Beschichtungswerkstoffes früh auf. Es entstehen ein Spurfrontbeginn außerhalb des Bestrahlbereiches und ein Schmelzbadbeginn unmittelbar bei der ersten Wechselwirkung mit der Laserstrahlung.

- sich das Schmelzbad mit steigender Energiedichte radial ausdehnt. Die nötige Mindestenergie zum Verflüssigen des Beschichtungswerkstoffes wird durch eine Erhöhung der Laserleistung auf einer größeren Fläche der Wechselwirkungszone erreicht. Das gesamte Schmelzbad dehnt sich dadurch aus und wird stärker erhitzt. Die Viskosität der Schmelzflüssigkeit nimmt ab und eine

ansteigende Schmelzbadströmung entsteht. Das Schmelzbad erstreckt sich bei hohen Laserleistungen bis in den Nachlauf und die gesamte Spurfront zerfließt.

- die Spurbhöhe und die Schmelzbadneigung abnehmen, da die erhöhte Schmelzbadtemperatur und verstärkte Schmelzbadströmung ein erweitertes Schmelzbad bewirken. Die steigende Laserleistung bei konstanter Pulvermenge lässt das Schmelzbad zerfließen und hat eine Spur mit geringer Spurbhöhe, hoher Aufmischung und Schmelzbadbreite als Ergebnis.

Eine geringe Energiedichte und damit schwach ausgebildete Schmelzbadströmung hat eine schmale Spur zur Folge. Die Spurbhöhe und Spurbneigung ist groß, da die Pulverpartikel zumindest so weit angeschmolzen werden, dass sie zu einer Spur verkleben. Durch die fehlende Durchmischung und mangelhafte Anbindung ist die Spurqualität nicht gegeben.

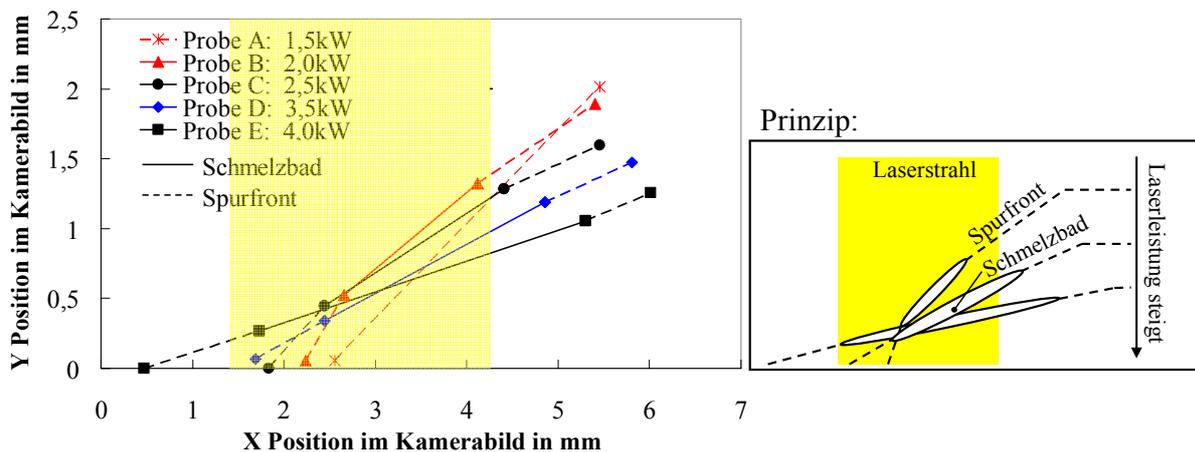


Bild 70: Nachbildung der Spurfront durch seitlich aufgenommene Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Prinzip der Spurfrontneigung und Schmelzbadausbildung bei variabler Laserleistung.

#### 4.2.1.3 Zone 3

In der Zone 3 findet keine bzw. eine vernachlässigbare Strahl-Stoff-Wechselwirkung statt. Die aufgetragene Beschichtungsspur kühlt durch Konvektion, Wärmestrahlung aber im Wesentlichen durch Wärmeleitung in den Aluminiumgrundwerkstoff ab.

In den Momentaufnahmen der CMOS-Kamera aus Bild 67 ist die abkühlende, helle Spur auf dem dunklen Grundwerkstoff aufgrund des Temperaturunterschiedes, jedoch im Wesentlichen wegen des höheren Emissionskoeffizienten der Beschichtungsspur

im Gegensatz zum Grundwerkstoff, zu erkennen. Mit einer Thermographiekamera wurden die Emissionskoeffizienten des Grund- und Beschichtungsmaterials bei gleicher Materialtemperatur in einem Bereich von 0-290°C ermittelt. Bild 71 zeigt die Messwerte der ermittelten Emissionskoeffizienten, wobei die Kurve des Beschichtungswerkstoffes von 0,36 auf 0,31 abfällt. Die Emissionskoeffizienten des Grundwerkstoffes bleiben auch bei steigender Temperatur annähernd konstant. Die Kurve für den Beschichtungswerkstoff stellt dabei nur eine Orientierung dar, da der Emissionskoeffizient von der Spurzusammensetzung abhängt, die durch Prozessvariationen in Form von unterschiedlichen Vermischungen mit dem Grundwerkstoff verändert wird. Es wird aber davon ausgegangen, dass der Emissionskoeffizient der beschichteten Spur immer größer ist als der des Grundwerkstoffes.

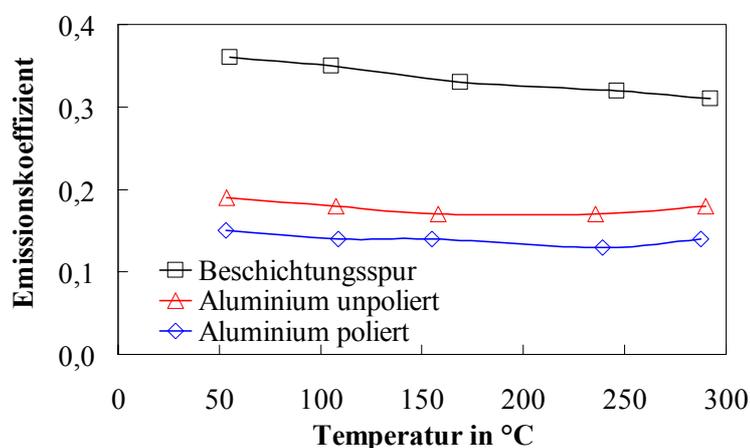


Bild 71: Temperaturabhängige Emissionskoeffizienten des Aluminiumgrundwerkstoffes und des Beschichtungswerkstoffes auf Kupferbasis mittels einer Thermographieanalyse.

#### 4.2.2 Bewertung der Beschichtungsbreite

Wie in Kapitel 3 beschrieben hat die Beschichtungsbreite bei Oberflächenveredelungsverfahren dahingehend eine entscheidende Rolle, als dass sichergestellt werden muss, dass die gesamte Oberfläche gleichmäßig beschichtet ist. Um das zu erreichen wird je nach Anwendung die Spurbreite auf die Zielkontur angepasst. Ist das aufgrund einer zu großen Fläche nicht möglich, werden überlappende Beschichtungs Spuren eingesetzt. Die Beeinflussung der Spurbreite kann dabei durch eine Vielzahl der Prozessparameter vorgenommen werden. Nach [2], [8] ist die Beschichtungsbreite

im Rahmen von gängigen experimentellen Prozessfenstern am maßgeblichsten vom Durchmesser des Laserstrahls und der Laserleistung abhängig. Prozessgrößen wie Vorschub und Pulverförderrate haben eine geringere aber dennoch einflussnehmende Wirkung auf die Beschichtungsbreite.

Änderungen im Schmelzbad, speziell Größenänderungen, machen sich in veränderten Emissionsintensitäten bemerkbar, wodurch als potentielle Sensorik sowohl integrale als auch orts aufgelöste Sensoren in Frage kommen. Ein großes Schmelzbad lässt eine große Beschichtungsbreite und intensive Emissionen erwarten. Dies konnte in den Untersuchungen nicht bestätigt werden. Die in dieser Arbeit getesteten integralen Sensoren haben sich als nicht geeignet zur Erkennung der Beschichtungsbreite herausgestellt. Grund dafür ist, dass bei den meisten integralen Sensoren der Einfluss der Laserleistung im Messsignal signifikanter ist als die Erkennung der Spurbreite. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt damit auf dem Kamerasystem, da hier eine Unterscheidung zwischen Temperatur des Schmelzbades, also der Emissionsintensität, und der Schmelzbadgröße möglich ist.

Der Vergleich der Beschichtungsbreite mit den Sensorsignalen setzt die Messung der Beschichtungsbreite durch Querschliffe an einer bestimmten Stelle oder eine kontinuierliche Vermessung der Breite entlang der gesamten Spur voraus. Die durchgängige Spurbreite wurde mit einem Triangulationsverfahren vermessen. Die Messung der Beschichtungsbreite mit einem Lichtschnittsensor hat sich als zuverlässiger herausgestellt, da ein Querschliff an einer Stelle durch vereinzelte Poren und ungleichmäßige Beschichtungsänderungen nicht zu einer zuverlässigen Messung der Beschichtungsbreite führt.

Die Draufsicht der Kamera durch die Pulverdüse ermöglicht die Erkennung und Vermessung des Schmelzbades aber auch den Bereich der Spurdimension wie Bild 72 zeigt. Eine Beschichtungsspur unterscheidet sich vom Grundwerkstoff durch eine andere metallurgische Zusammensetzung, die wiederum einen anderen Emissionskoeffizient als das Aluminium des Grundwerkstoffes aufweist. Weiterhin muss der Zusatzwerkstoff eine bestimmte Temperatur, die Schmelztemperatur überschreiten, um von seiner pulverförmigen Ursprungsgestalt in eine Spur geschmolzen werden zu können. Die Temperatur des zumindest teilweise verflüssigten Zusatzwerkstoffes ist höher, als die des umliegenden Aluminiumkörpers, da dieser sich erst durch Wärmeleitung erhitzen muss. Diese beiden Merkmale, der Unterschied im Emissionskoeffizient und in der Temperatur, werden von der Kamera orts aufgelöst erkannt und können so die aufbeschichtete Spur vom Grundwerkstoff unterscheiden. Damit wird als Indikator für die Spurbreite kein Geometriemerkmale des Schmelzbades verwendet

sondern die erkannte und im Bild 72c außen markierte Bearbeitungsdimension. Die markierte Bearbeitungsdimension wird analog zum Schmelzbad bildverarbeitungstechnisch vermessen und das maximale Abmaß der Bearbeitungsdimension orthogonal zur Vorschubrichtung ergibt die Spurbreite in Pixel.

Bild 73 gibt hierzu drei Beispiele von unterschiedlichen Spurbreiten, bei denen sich die erkannte und vermessene Bearbeitungsdimension analog zu den Spurbreiten der Querschleife verhält.

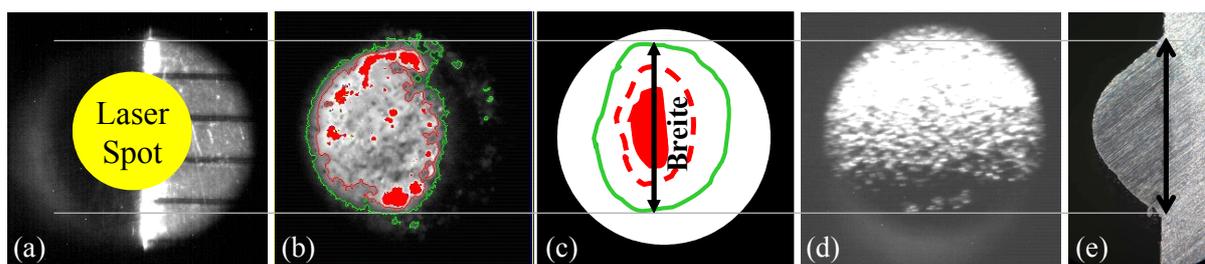


Bild 72: Messprinzip der Breitenerkennung. (a) Maßstab in 1mm/Skalenteil und Laserposition, (b) erkannte und markierte Bearbeitungsdimension, (c) Prinzipbild der Breitenerkennung, (d) Draufsichtmomentaufnahme der Prozessüberwachungskamera beim nachträglichen Überfahren der Spur und (e) Querschleiff der Spur.

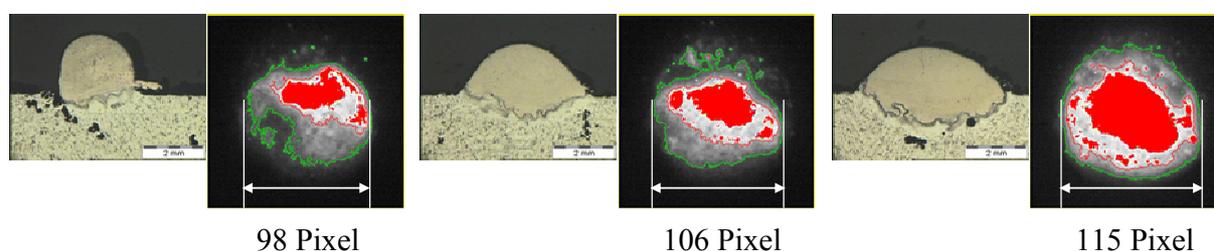


Bild 73: Proben mit unterschiedlichen Breiten und zugehöriger Diagnose des Pixelwertes.

Nimmt man eine Umrechnung der Pixelbreite in das metrische System über den Maßstab aus Bild 72a vor, kann die Beschichtungsbreite über den gesamten Spurverlauf z.B. in Millimetern angegeben werden. Bild 74 zeigt hierzu von drei verschiedenen Spuren den Prozessverlauf. Eine der Spuren (Probe K) ist mit konstanten Prozessparametern beschichtet. Dies spiegelt sich auch in der annähernd konstanten Spurbreite, die durch einen Triangulationssensor vermessen ist, und der kamerabasierten Breitenerkennung wider. Probe L startet mit verringerter Laserleistung und verringertem Pulvermassenstrom und wird jeweils mit einer Parameter-

rampe innerhalb der ersten Sekunde auf den Wert von Probe K gesteigert. Sowohl die reale Spurbreite als auch die durch die Kamera erkannte Spurbreite zeigen einen kontinuierlichen Anstieg auf das Niveau von Probe K. Probe M ist ähnlich zu Probe L bearbeitet, nur dass hier keine Leistungsrampe sondern ein Leistungssprung nach einer Sekunde erfolgt. Das macht sich auch in einem Sprung in der Spurbreite bemerkbar. Auch hier korreliert die Prozessdiagnose mit der realen Spurbreite. Umfangreicheres Datenmaterial kann aufgrund der Übersichtlichkeit in Bild 74 nicht gezeigt werden. Die sonst in dieser Arbeit übliche Darstellung der parameterübergreifenden Korrelation der Querschlifffauswertung zu den Mittelwerten der Sensorsignale kann wegen der oben genannten Problematik der Querschlifffvermessung nicht eingesetzt werden.

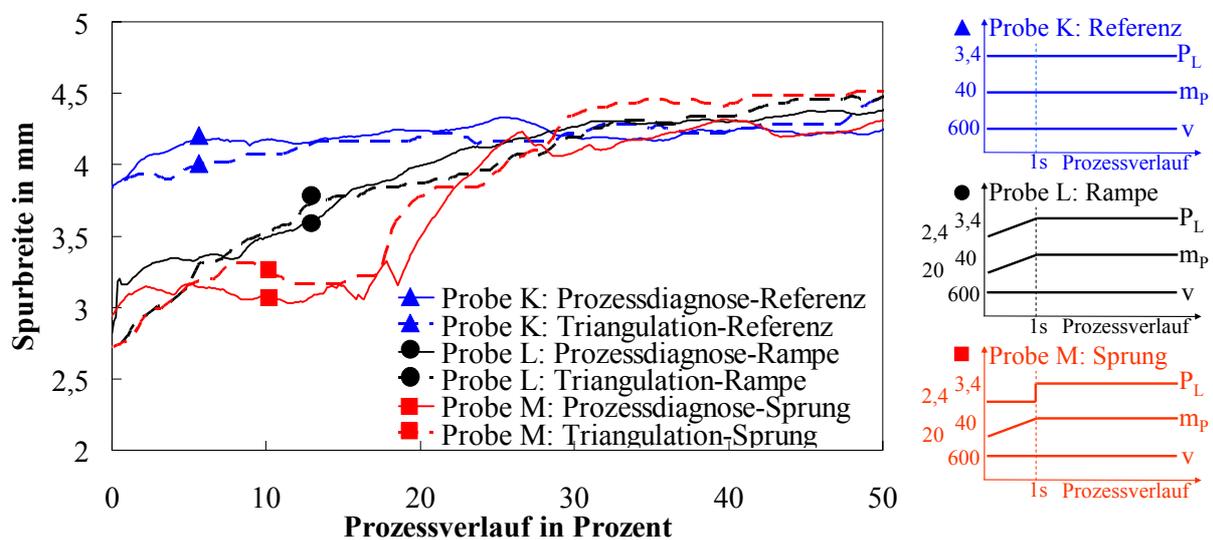


Bild 74: Diagnose der Beschichtungsbreite durch die Prozessüberwachungskamera über den Prozessverlauf im Vergleich zur realen Beschichtungsbreite durch ein Triangulationssystem.

### 4.2.3 Bewertung der Beschichtungshöhe

Die Spurbhöhe gibt durch die maximale Höhe des Beschichtungswerkstoffes über dem Grundwerkstoff und ihrer charakteristischen Form darüber Aufschluss, ob die aufgetragene Schichtdicke ausreichend ist.

Der Einfluss der Prozessparameter auf die Spurbhöhe wird in der Literatur [10], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [33] und in Kapitel 4.2.1 dargestellt. Zusammenfassend kann für ein produktionsnahes Parameterfenster angenommen werden, dass für eine

große Spurrhöhe eine Parameterkombination zu wählen ist, bei der die eingebrachte Wärme  $Q_B$ , die notwendige Pulverenergie  $Q_P$  geringfügig übersteigt. Liegt zu wenig Energie vor, wird das Pulver aufgeschmolzen, aber die Wechselwirkungszone nicht bis zum Ausbilden einer Schmelzbadströmung erhitzt und keine Verbindung mit dem Grundwerkstoff erzeugt. Eine solche Spur ist hoch aber von minderer Qualität, weil sie schmal und schlecht angebunden ist. Eine gegenteilige Parameterkombination mit einem großen Überschuss an eingetragener Energie gegenüber der Pulverenergie hat eine Spur mit geringer Spurrhöhe und ebenfalls schlechter Qualität zur Folge. Es entsteht ein heißes Schmelzbad und eine starke Schmelzbadströmung, wodurch viel Grundwerkstoff verflüssigt wird. Daraus folgt ein breites und tiefes Schmelzbad, das die Spur zu geringer Höhe und großer Breite zerfließen lässt. Der hohe Anteil an aufgeschmolzenem Grundwerkstoffe bewirkt eine hohe Aufmischung, die sich negativ auf die Spureigenschaft auswirkt. Eine Zusammenstellung von Querschliffen, Schmelzbadaufnahmen und Analysen von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für die oben genannten Extreme und den Normalbereich in der Mitte ist in Bild 75 für die Variation der Pulverfördermenge und in Bild 76 für die Variation der Laserleistung gegeben.

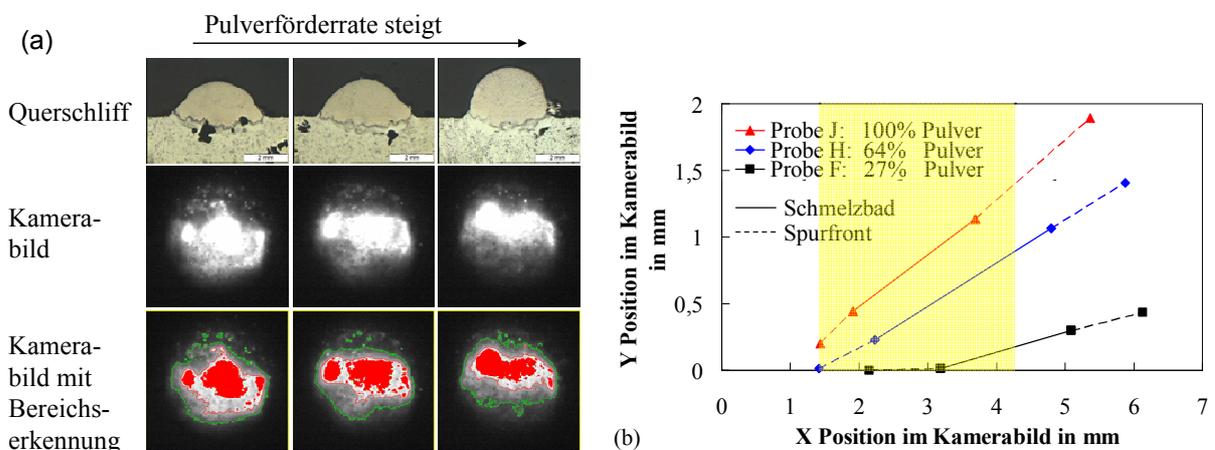


Bild 75: (a) Schliffpräparation, CMOS-Aufnahmen mit und ohne Bereichserkennung sowie (b) Spurfrenyanalysen der seitlich aufgenommenen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für drei verschiedene Pulverfördermengen.

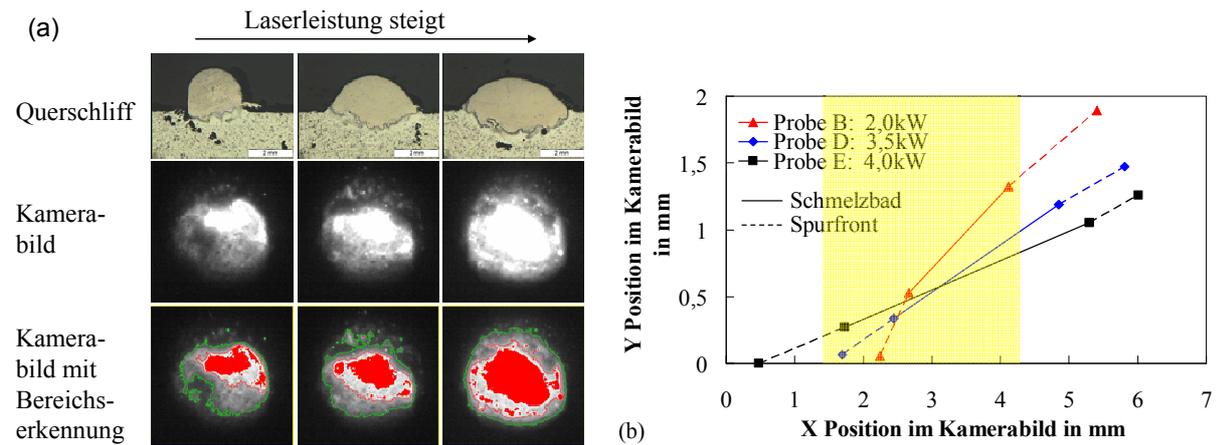


Bild 76: (a) Schliffpräparation, CMOS-Aufnahmen mit und ohne Bereichserkennung sowie (b) Spurfrontanalysen der seitlich aufgenommenen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für drei verschiedene Laserleistungen.

Fasst man die Informationen aus den Querschliffen, der CMOS- und der Hochgeschwindigkeitskamera zusammen, ergibt sich ein Bild über die Zusammenhänge der Prozessemissionen und der Spurbhöhe. Bild 77 verdeutlicht, dass die Schmelzbadfläche nicht mit der Spurbhöhe korreliert. Bild 77 zeigt außerdem, dass bei der Variation eines Prozessparameters sowohl die Spurbhöhe als auch die Schmelzbadfläche einer Tendenz folgen. Abhängig vom variierten Prozessparameter ist die Richtung der Tendenzen nicht einheitlich gleich- oder gegensinnig, sondern z.B. bei der Laserleistungsvariation gegensinnig und bei der Variation der Vorschubgeschwindigkeit gleichsinnig. Die Schmelzbadfläche kann nicht als Indikator für die Spurbhöhe verwendet werden.

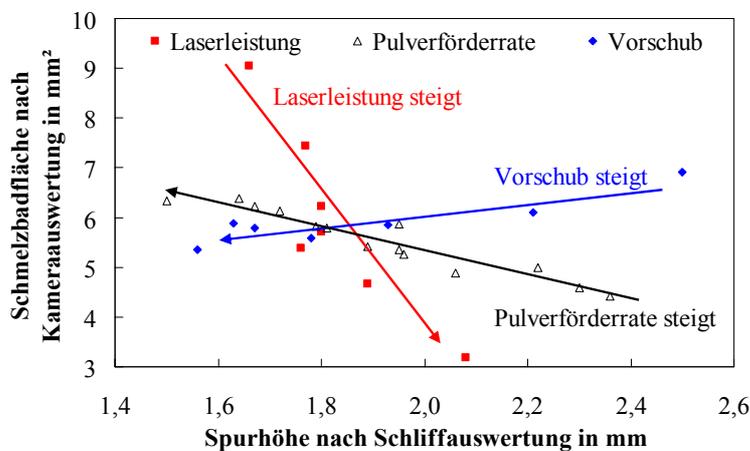


Bild 77: Schmelzbadfläche in der Draufsicht in Abhängigkeit der Spurbhöhe bei verschiedenen Parametervariationen.

**Prozessparameter, die die Spurbhöhe vergrößern, ziehen folgende Effekte nach sich:**

- Effekt 1: Erhöhung der Schmelzbadneigung (siehe Bild 78a), da mit steigender Beschichtungshöhe mehr Pulver innerhalb der gleichen Strecke aufgeschmolzen wird.
- Effekt 2: Verschiebung des Schmelzbadmittelpunktes in Vorlaufrichtung als Resultat der Verschiebung des Schmelzbadstarts und/oder -endes, siehe Bild 78b.

Verschiebung des Schmelzbadstartes in Vorlaufrichtung weil die nötige Energie- und Pulvermenge schon früh vorliegt und die Wechselwirkungszone vollständig zum Beschichten von Pulvermasse genutzt wird (siehe Kapitel 4.2.1.1).

Verschieben des Schmelzbadendes in Vorlaufrichtung weil größere Spurbhöhen mehr Beschichtungspulver benötigen und damit die vorhandene Energie je Pulverpartikel sinkt und das Schmelzbad früher unter Schmelztemperatur abkühlt (siehe Kapitel 4.2.1.2).

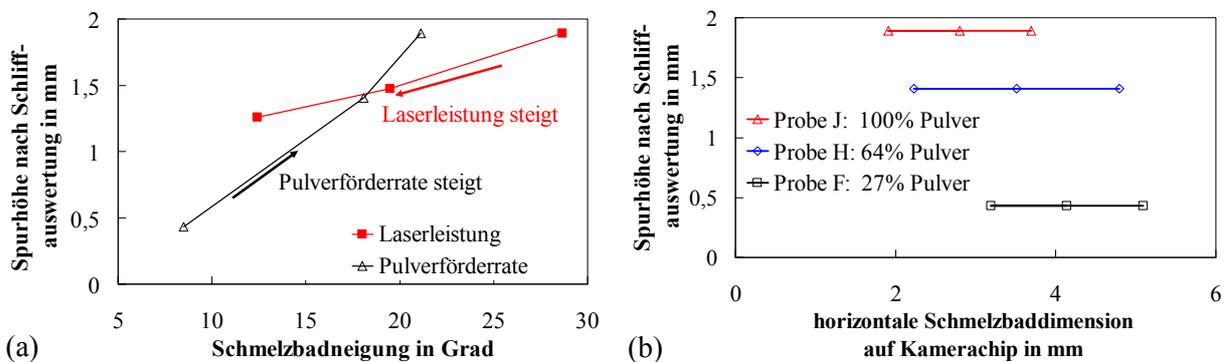


Bild 78: Effekte der Spurbfront in Abhängigkeit der Beschichtungshöhe und der Prozessparameter: (a) Schmelzbadneigung in Abhängigkeit von Pulverstrom- und Leistungsänderungen (Effekt 1), (b) Schmelzbadausbildung in der Draufsicht in Abhängigkeit von Pulverstromänderungen (Effekt 2).

Die physikalischen Vorgänge im Schmelzbad, die auf die Spurbhöhe Einfluss nehmen, wirken sich auf das Emissionsbild der Prozessüberwachungskamera (Draufsichtsperspektive) folgendermaßen aus:

1. Die Steigerung der Spurbhöhe, die eine Erhöhung der Schmelzbadneigung (Effekt 1) bei gleicher Schmelzbadgröße zu Folge hat, lässt den Mittelpunkt des Schmelzbades  $M_B$  in Vorlaufrichtung wandern, siehe Bild 79.

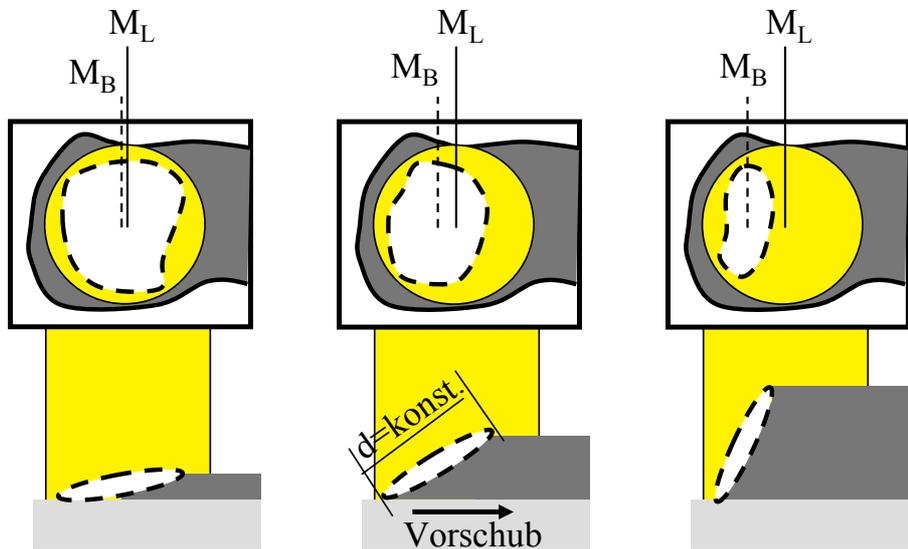


Bild 79: Prinzip der Schmelzbadneigung in Abhängigkeit zum Schmelzbadmittelpunkt  $M_B$  bei verschiedenen Beschichtungshöhen.  $M_L$  entspricht dem Laserspotmittelpunkt.

2. Die Steigerung der Spurbhöhe durch einen früheren Schmelzbadstart sowie das frühere Schmelzbadende (Effekt 2) sind verantwortlich für eine Verschiebung des Schmelzbadmittelpunktes in Vorlaufrichtung, siehe Bild 80.

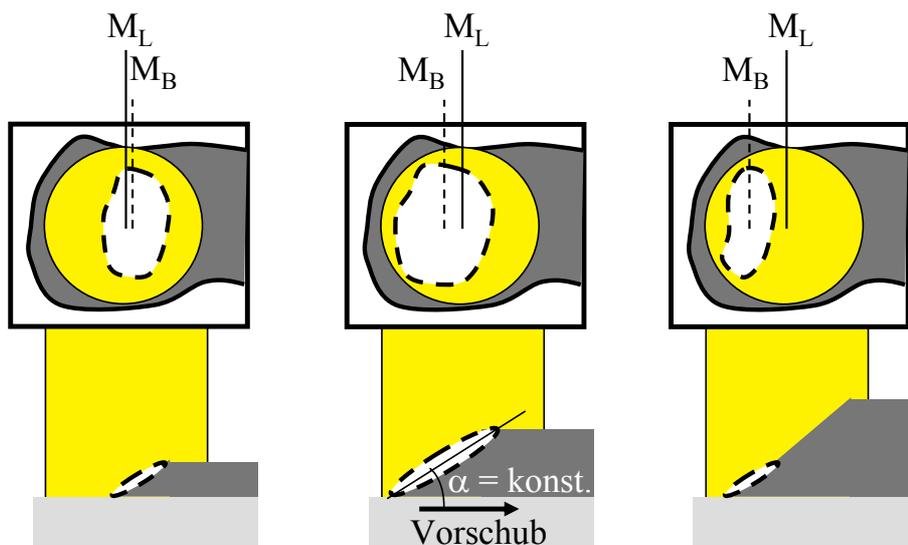


Bild 80: Prinzip der Schmelzbadausbildung in Abhängigkeit zum Schmelzbadmittelpunkt bei verschiedenen Beschichtungshöhen.  $M_L$  entspricht dem Laserspotmittelpunkt.

Diese zwei Effekte, die einzeln oder in Kombination auftreten, bewirken, dass bei einem aus der Draufsicht betrachteten Schmelzbad der Schmelzbadmittelpunkt  $M_B$  in Bezug zum Laserstrahlmittelpunkt  $M_L$  mit zunehmender Beschichtungshöhe in Vorlaufrichtung wandert.

Da die Auswertung der orts aufgelösten Intensitätsverteilung zur Erkennung der Beschichtungshöhe nötig ist, liegt der Schluss nahe, dass integrale Sensoren die Beschichtungshöhe nicht zuverlässig erkennen und es wird die koaxial installierte CMOS-Kamera aus Bild 61 eingesetzt. Die durch die Bildverarbeitung ausgewerteten Messsignale dieser Kamera werden den Beschichtungsergebnissen auf zwei Arten gegenüber gestellt. Von Beschichtungsspuren ohne Parameteränderung innerhalb des Beschichtungsvorgangs werden Querschliffe angefertigt und vermessen weil hier von einer annähernd konstanten Spurhöhe über die gesamte Spur ausgegangen wird. Das Prozessüberwachungssignal, der Positionswert des Schmelzbadmittelpunktes, wird im Bereich der Querschliffpräparation zu einem Durchschnittswert zusammengefasst und mit dem Querschliffergebnis verglichen. Zusätzlich werden Spuren, speziell solche, die in ihrem Höhenverlauf nicht konstant waren, mit einem Triangulationssensor vermessen, um die Höheninformation über den Spurverlauf zu erhalten.

Setzt man den Schmelzbadmittelpunktswert der Kameraüberwachung mit dem nachträglich aufgenommenen Höhenprofil des Triangulationssensors in Beziehung, erhält man als Ergebnis Bild 81 für eine konstante Probe N, eine Probe O mit einem Pulverförderratensprung auf die halbe Pulvermenge und eine Probe P mit einem Laserleistungsabfall auf achtzig Prozent. Mit empirisch ermittelten Faktoren wird die Schmelzbadposition als Pixelwert zu einer Höheninformation in Millimeter umgerechnet.

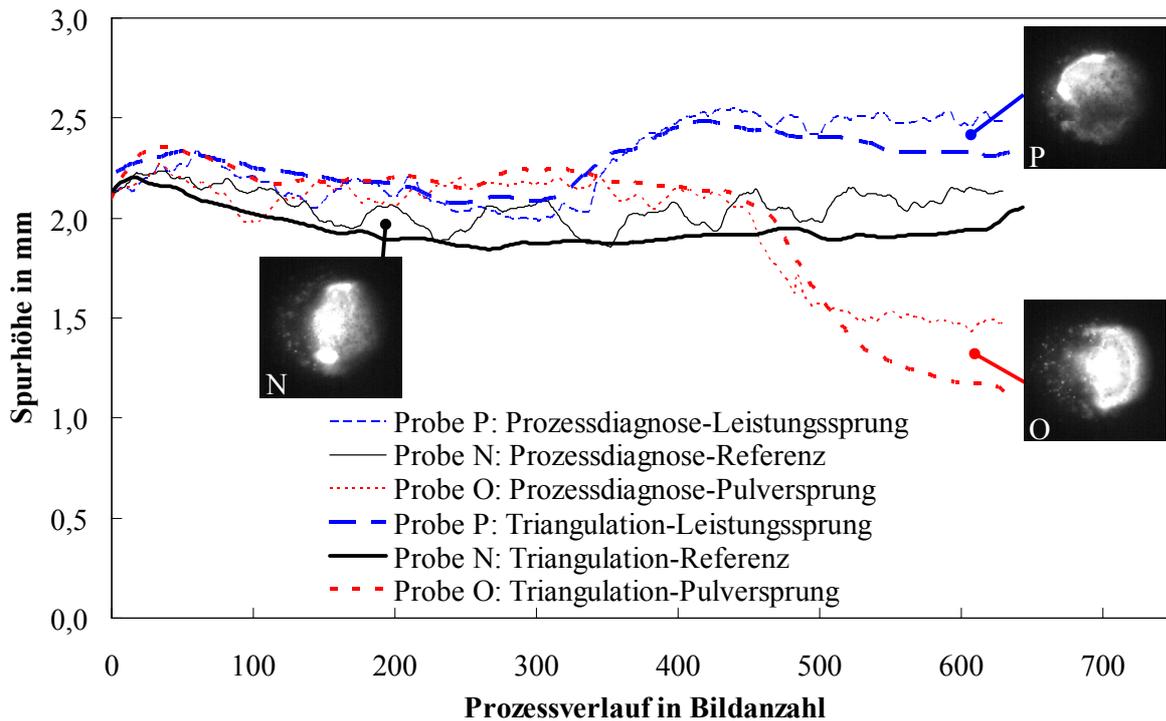
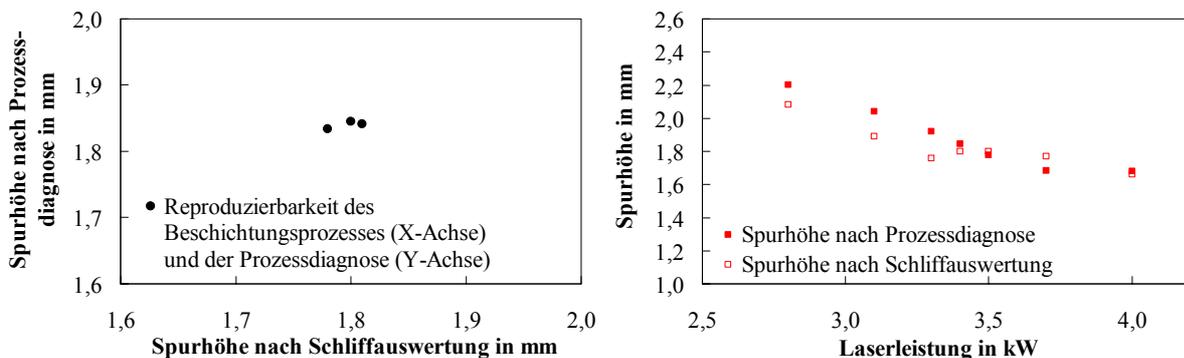


Bild 81: Diagnose der Beschichtungshöhe durch eine Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur realen Beschichtungshöhe durch eine Triangulationsmessung für eine Referenzspur (Probe N), einen Leistungssprung von 100% auf 80% (Probe P) und einem Pulvermassesprung von 100% auf 50% (Probe O).

Ebenso wichtig wie die Änderungen der Spurhöhe innerhalb des Prozessverlaufes zu bewerten ist es, die Spurhöhe absolut und von den Prozessparametern unabhängig zu erkennen.

Voraussetzung dafür ist eine zuverlässige Erkennung von Tendenzen der Ergebnisgrößen innerhalb einer Parametervariation (siehe Bild 82). Die reale Spurhöhe wurde im Mittelbereich der Spur durch einen Querschliff vermessen.



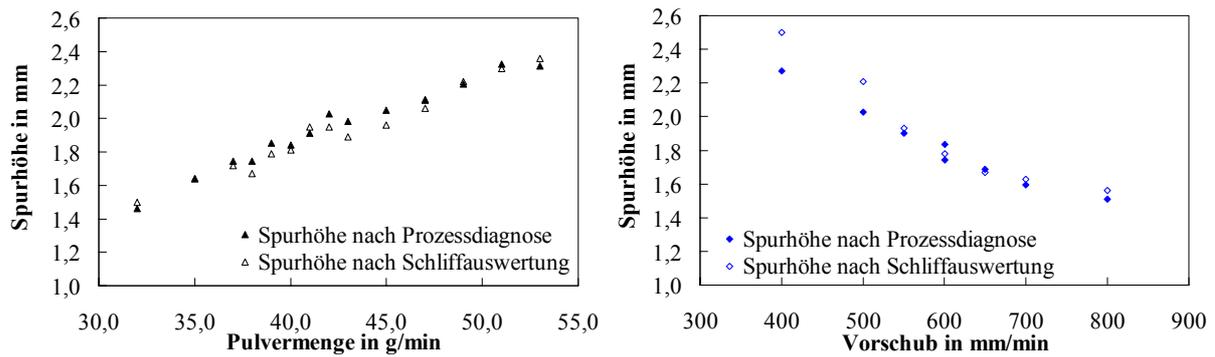


Bild 82: Diagnose der Beschichtungshöhe durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur Querschliffauswertung bei jeweils einer Prozessparametervariation.

Stimmen diese erkannten Tendenzen in ihrer Dimension mit den Änderungen der Dimensionen der Ergebnisgrößen variationsübergreifend überein, so ist der Indikator in der Lage, absolut und nur auf Basis seiner Messinformationen die Beschichtungshöhe zu bestimmen. Dieser Prüfung wurde der Indikator der Schmelzbadposition für die Spurbhöhe im Rahmen eines Versuchsprogramms mit Einzelparameter- und kombinierten Parametervariationen unterzogen. Bild 83 zeigt die Übereinstimmung der realen zur erkannten Beschichtungshöhe, die der Forderung aus Kapitel 3.3.2, die Beschichtungshöhe auf  $\pm 0,2\text{mm}$  zu erkennen, nachkommt.

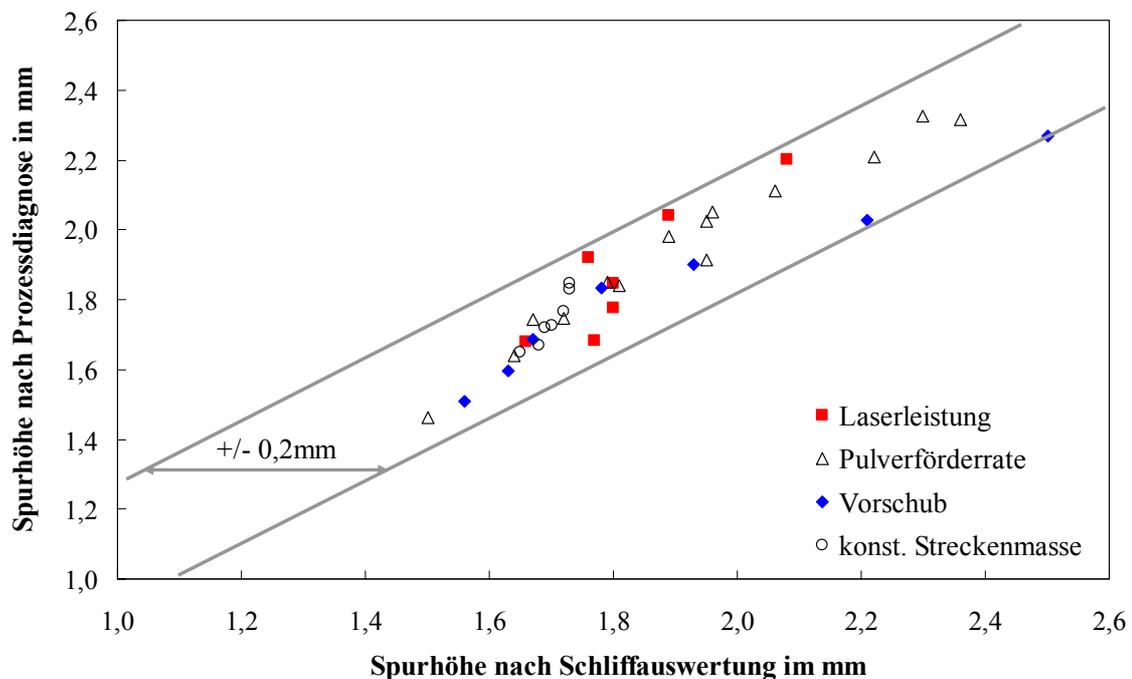


Bild 83: Diagnose der Beschichtungshöhe durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur Querschliffauswertung bei verschiedenen Parametervariationen.

#### 4.2.4 Bewertung der Aufmischung

Die Aufmischung ist verantwortlich für die Anhaftung der Spur am Grundwerkstoff und für die Spurreinheit hinsichtlich Vermischung mit dem Grundwerkstoff. Aus diesem Grund ist die Aufmischung als Verhältnis zwischen der Querschnittsfläche unterhalb der Grundwerkstoffoberfläche und der gesamten Querschnittsfläche der Spur definiert (siehe Bild 84a). Die Fläche  $A_2$ , also die metallurgische Verbindungszone, ist verantwortlich für die Anhaftung der Spur am Grundwerkstoff. Bild 84b zeigt einen deutlichen Aufmischungsfehler in Form einer mangelnden Spurhaftung. Es liegt nahezu keine Verbindungszone mit großen Poren zwischen beiden Werkstoffen vor, die Aufmischung ist zu gering. Bild 84c zeigt eine Spur mit normaler und Bild 84d eine mit zu hoher Aufmischung. Die Verbindungszone von Bild 84d ist stark ausgeprägt, so dass viel Grundwerkstoff in die Spur gemischt wurde, wodurch die Spur ihre gewollte Eigenschaft des reinen Beschichtungswerkstoffes verliert. Die ideale Aufmischung ist nur so groß, dass die Spur mit dem Grundwerkstoff metallurgisch mit entsprechender Spurhaftung verbunden ist und damit nur die minimale, haftungsbedingte Vermischung durch den Grundwerkstoff erfährt.

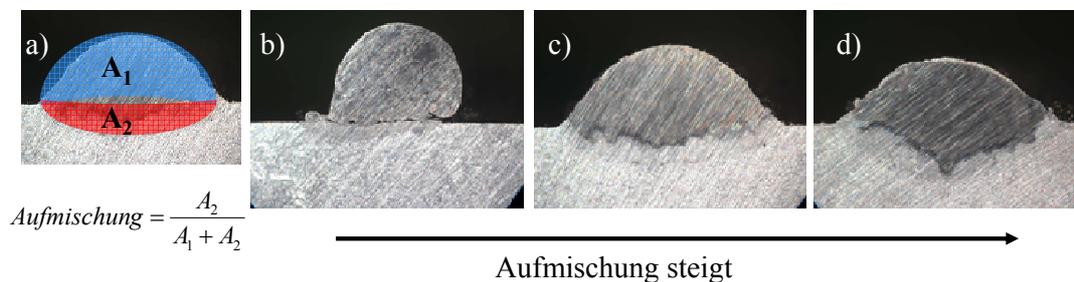


Bild 84: (a) Definition der Aufmischung, Querschliffphotographie einer (b) geringen Aufmischung, (c) normalen Aufmischung und (d) hohen Aufmischung.

Einflussreichste Prozessparameter zur Änderung der Aufmischung sind nach [2], [25] und den Untersuchungen dieser Arbeit die Laserleistung und die Pulverfördertrate. Eine Steigerung der Laserleistung oder Verringerung der zugeführten Pulvermenge führt zu einer Erhöhung der Schmelzbadtemperatur und -strömung, wodurch die Eindringtiefe in den Grundwerkstoff und damit die Aufmischung steigt.

Um die Aufmischung sensorisch zu erkennen, stehen zwei Vorgehensweisen zur Verfügung.

### 1. Ein direkter Indikator, der die Aufmischung aus den Prozessemissionen erkennt.

Änderungen der Aufmischung sind mit physikalischen Änderungen im Schmelzbad und dessen Emissionen verbunden. Folgende theoretische Ansätze wurden experimentell getestet und in ihrer Aussagekraft bewertet.

Eine steigende Aufmischung setzt eine größer werdende Schmelzbadtemperatur voraus, um den Grundwerkstoff anschmelzen zu können. Ein integraler Temperatursensor, eine IR-Photodiode, misst die Temperatur der Wechselwirkungszone als Indikator für die Aufmischung. Bild 85a zeigt, dass die Temperatur der Wechselwirkungszone kein hinreichender Indikator für die Aufmischung ist, da im Signal der Photodiode vor allem der Einfluss der Laserleistung die Erkennung der Aufmischung stört.

Eine veränderte Aufmischung der Beschichtungsspur durch den Grundwerkstoff bringt eine modifizierte metallurgische Zusammensetzung der Spur mit sich, die sich in einer Veränderung der spektralen Emissionen äußern sollte. Bild 85b zeigt, dass eine mögliche spektrale Änderung von der dominierenden Änderung in der Laserleistung überlagert wird.

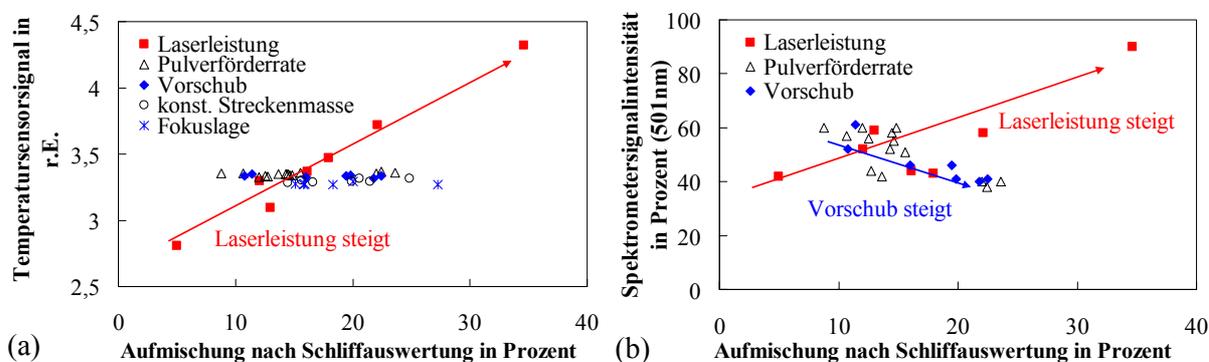


Bild 85: Diagnose der Aufmischung durch integrale Sensoren mit auffällig dominierendem Einfluss von Änderungen in der Laserleistung am Beispiel (a) eines Temperatursensors und (b) eines Spektrometers.

Die getesteten integralen Sensoren waren zum Teil in der Lage die Aufmischung innerhalb einer Parametervariation zu erkennen, aber nicht parameterübergreifend. Ursache dafür kann in der Definition der Aufmischung liegen. Die Definition besagt, dass die Fläche  $A_1$  oberhalb des Grundwerkstoffes, also die Kapazität der Spur die Vermischung mit dem Grundwerkstoff aufzunehmen, maßgeblichen Einfluss auf die

Aufmischung hat. Die Fläche  $A_1$ , die eine direkte Abhängigkeit zur Spurbhöhe hat, wird von integralen Sensoren nach Kapitel 4.2.3 nicht erkannt.

## 2. Ein indirekter Indikator, der die zwei Größen $A_1$ und $A_2$ der Aufmischung separat erkennt und die Aufmischung daraus berechnet.

Die Fläche  $A_1$  kann durch die in Kapitel 4.2.3 dargestellte Erkennung der Spurbhöhe abgeschätzt werden, weil nach [33] die Beschichtungsbreite in einem Verhältnis von 0,7- 1,0 zur Spurbhöhe steht und  $A_1$  durch eine Kreissegmentbestimmung näherungsweise berechnet werden kann.

Für die Fläche  $A_2$ , die Größe der metallurgischen Verbindungszone, wurde eine Abhängigkeit zur Schmelzbadgröße ermittelt. Durch die Abhängigkeit der Schmelzbadgröße von der Schmelzbadtemperatur und der vorhandenen Schmelzbadströmung ist näherungsweise davon auszugehen, dass die horizontale Schmelzbadausdehnung proportional zur vertikalen, in den Grundwerkstoff hineinreichenden Ausdehnung ist. Die Schmelzbadfläche, die zusammen mit der Temperaturverteilung von der prozessüberwachenden CMOS-Kamera erkannt und durch Bildverarbeitung in eine absolute Größe umgerechnet wird, dient als Indikator für die Fläche  $A_2$  unterhalb der Grundwerkstoffoberfläche (siehe Bild 86).

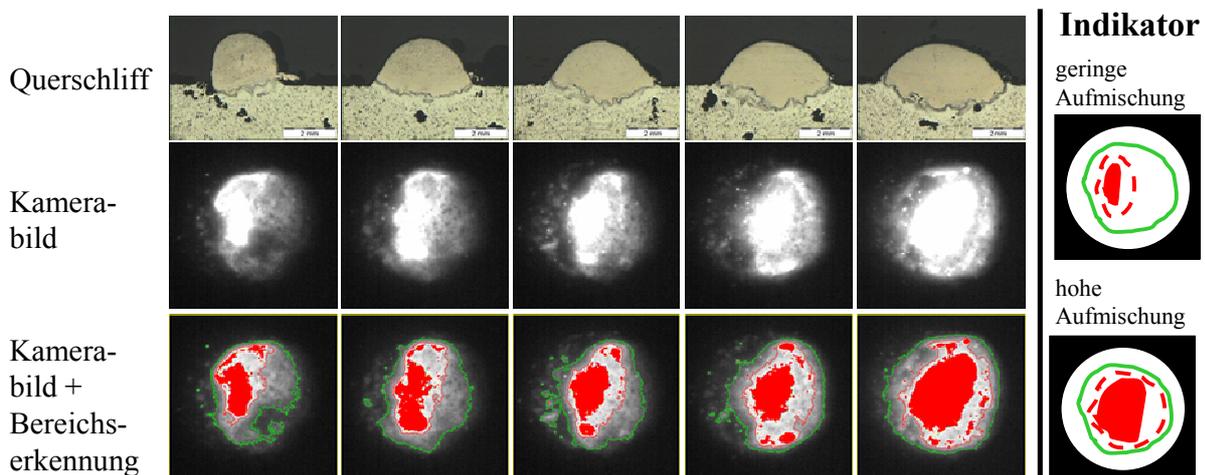


Bild 86: Prinzipskizze des Indikators zur Erkennung der Aufmischung sowie Querschliffe und Momentaufnahmen von Prozessen mit unterschiedlichen Aufmischungen.

Indem man die beiden, unabhängig voneinander erkannten Größen, die Spurbhöhe und die Größe der Verbindungszone  $A_2$ , miteinander verrechnet, erhält man einen Indikator für die Aufmischung. Die empirisch ermittelte Aufmischungsberechnung aus Gl.4.25 wird durch den Vergleich mit der realen Aufmischung als geeignet bewertet.

$$\begin{aligned} \text{Indikator}_{\text{Aufmischung}} &= a \cdot \text{Fläche}(A_2) - b \cdot \text{Spurbhöhe} \\ \text{Indikator}_{\text{Aufmischung}} &= a \cdot (\text{Schmelzbadfläche}) - b \cdot (\text{Schmelzbadposition}) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Die Koeffizienten a und b haben zwei Aufgaben. Zum einen ermöglichen sie das Verrechnen eines Flächenwertes mit einem Positionswert auf dem CMOS-Chip. Das Umrechnen der Schmelzbadfläche erfolgt mit dem Faktor a in die Fläche  $A_2$  und der Schmelzbadposition mit b in die Spurbhöhe bzw. in die Fläche  $A_1$ . Zum anderen ist die Gl.4.25 nicht identisch mit der Definition der Aufmischung, stellt aber den physikalischen Zusammenhang einer steigenden Aufmischung durch eine zunehmende Spurbtiefe oder abnehmende Spurbhöhe nach. Die Koeffizienten a und b schaffen dazu das richtige Verhältnis mit einer absoluten Aufmischung als Ergebnis.

Durch diese Methode ist ein Online-Prozessdiagnosesystem in der Lage die Qualitätsgröße der Aufmischung, die zum Teil unterhalb der Bauteiloberfläche liegt, also von einem Triangulationssensor nicht gemessen werden kann, zu erkennen. Bild 87 zeigt eine vom Prozessdiagnosesystem erkannte abfallende Aufmischung im Fall eines Laserleistungsabfalls nach der Hälfte des Prozessverlaufes (Probe R) im Gegensatz zur Referenzspur Probe S. Verglichen werden kann die erkannte Aufmischung in ihrer Signaländerung mit dem Prozessergebnis, das in einer Spurfotographie dargestellt ist. Das Foto zeigt im Bereich des Leistungsabfalls eine Verfärbung der Spur zum reinen kupferfarbenen Beschichtungspulver, eine glattere Spuroberfläche und eine schmalere und höhere Spur. Dies alles sind Indizien für eine fallende Aufmischung. Der Effekt einer steigenden Aufmischung durch eine Halbierung der zugeführten Pulvermenge ist ebenfalls in Bild 87 zu sehen. Der Aufmischungsanstieg der Probe Q setzt verzögert zum Aufmischungsabfall der Probe R ein, weil sich der am Pulverförderer eingestellte Pulversprung nach halbem Prozessverlauf durch noch vorhandenes Pulver im Pulverzuführsystem zu einer verzögerten Sprungantwort entwickelt. Der starke Anstieg der Aufmischung von Probe Q, also ein stärkeres Vermischen mit dem Aluminiumgrundwerkstoff ist im Spurfoto durch einen Farbumschlag ins goldgelbe zu erkennen. Weiteres Anzeichen für die erhöhte Aufmischung ist die flacher und breiter werdende Spur.

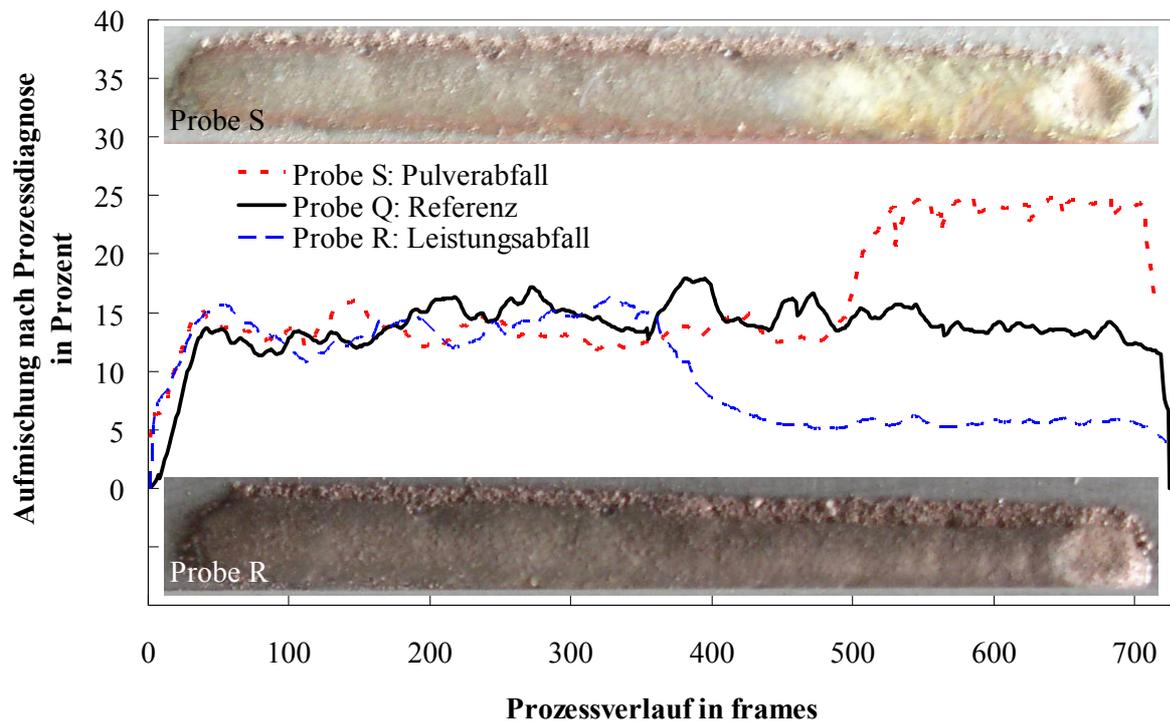


Bild 87 Diagnose der Aufmischung durch die Prozessüberwachungskamera für einen Normalprozess sowie eine steigende und fallende Aufmischung.

Trägt man für konstante Spurverläufe die gemessenen und weiterverarbeiteten Signalwerte, die im Bereich der Querschleifpräparation gemittelt werden, in Bezug zur Querschleifanalyse über verschiedene Parametervariationen in einem Diagramm auf, Bild 88, demonstriert der Indikator seine Fähigkeit, die Aufmischung absolut zu erkennen. Über verschiedene Einzelparametervariationen und kombinierte Parametervariationen wurde die Aufmischung in verschiedenen Ausmaßen verändert und der Indikator reagiert dabei nicht auf Prozessparametereinflüsse sondern ist in der Lage die Aufmischung auf  $\pm 6\%$  zu erkennen.

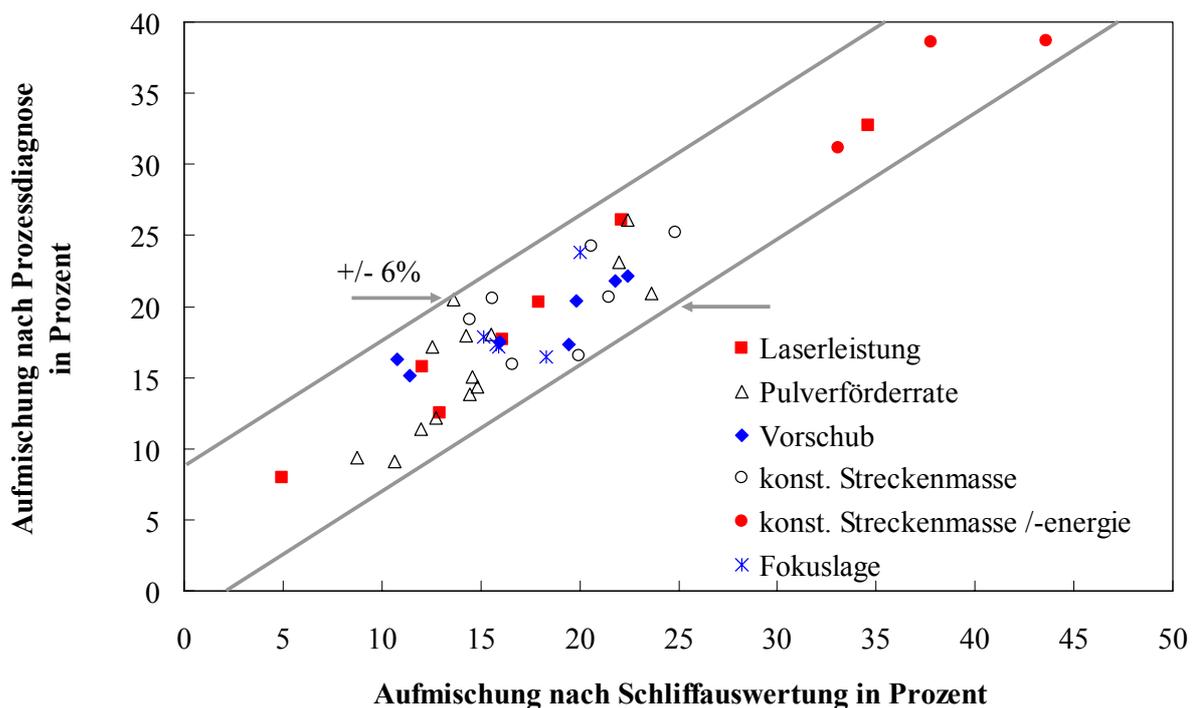


Bild 88: Diagnose der Aufmischung durch die Prozessüberwachungskamera im Vergleich zur Querschliffauswertung bei verschiedenen Prozessparametervariationen.

#### 4.2.5 Erkennung von Fehlern in der Spursymmetrie

In einem optimierten Beschichtungsprozess wird durch ein Zusammenspiel von Vorschub, Laserleistung und Pulverzufuhr die Menge Beschichtungspulver zugeführt, die von der Laserstrahlung mit der gewünschten Aufmischung aufgetragen werden kann. Liegt das Maximum der Pulver- und Leistungsverteilung quer zur Vorschubrichtung nicht deckungsgleich, kommt es an einer Seite der Spur wegen der fehlenden Pulvermenge zu einer verringerten Spurbhöhe (siehe Bild 89b). An der anderen Seite entsteht die maximale Spurbhöhe bei verringerter Anbindung aufgrund der fehlenden Schmelzbadtemperatur durch das versetzte Maximum des Pulverstroms.

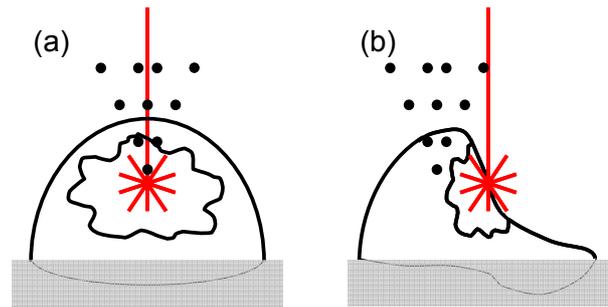


Bild 89: Prinzipbild eines a) deckungsgleichen Mittelpunktes des Pulver- und Laserstrahl-auffreffpunktes und b) einem Versatz der beiden Mittelpunkte.

Zu sehen ist dieser Sachverhalt in Bild 90. Ein Vergleich einer korrekt beschichteten Spur (Probe T) zu einer Spur mit versetztem Pulvermittelpunkt zum Laserstrahlmittelpunkt (Probe U). Pulvermittelpunkt ist der Ort, an dem die maximale Pulvermenge auftritt, analog zum Zentrum des Laserstrahlmittelpunktes, der dem Ort des Maximalwertes der gaußähnlichen Intensitätsverteilung entspricht. Bei sehr großen Abweichungen zwischen Pulver- und Laserstrahlmittelpunkt kann es auf der Seite der hohen Pulver- und geringen Leistungsdichte dazu kommen, dass nur noch anhaftende Tropfen aufgeschmolzen werden. Beim Beschichten von geradlinigen Spuren kann der Pulverauffreffpunkt relativ zum Laserstrahlmittelpunkt entlang der Achse der Vorschubrichtung verschoben werden, um den Pulvernutzungsgrad zu optimieren. Um sich den Vorteil einer richtungsunabhängigen Beschichtungsanlage zu verschaffen, müssen Pulver- und Laserstrahlmittelpunkt identisch sein. Im Folgenden wird die Annahme eines richtungsunabhängigen Systems vorausgesetzt, bei dem die beiden Auftreffpunkte übereinstimmen müssen. Abweichungen führen zu unsymmetrischen Spuren und müssen erkannt werden. Eine Möglichkeit eine unsymmetrisch beschichtete Spur durch einen integralen Sensors zu erkennen ist in Bild 90 dargestellt. Das Plasmasignal hat bei der unsymmetrischen Spur, aufgrund der deformierten Spurfront und Beschichtungsspur, einen von der symmetrischen Beschichtung unterschiedlichen Signalverlauf.

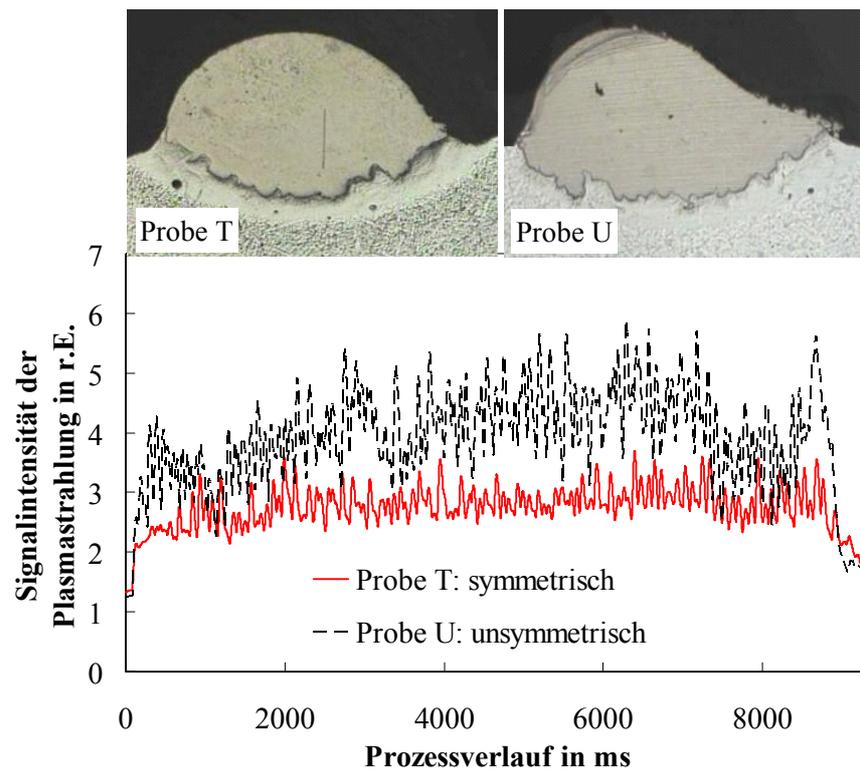


Bild 90: Diagnose von unsymmetrischen Spuren durch einen integralen Plasmasensor anhand des unregelmäßigen Signalverlaufes.

Als Ursache für unsymmetrische Spuren wurden Abweichungen zwischen den Mittelpunkten der Pulver- und Leistungsverteilung identifiziert. Ein unbeabsichtigtes und unbemerktes Verschieben des Laserstrahlzentrums gilt als sehr unwahrscheinlich, da der Strahl von einer fest montierten Optik geführt wird. In Gegensatz dazu kann die Pulverdüse durch mechanischen Kontakt leicht verstellt werden. Eine verstellte Pulverdüse ist somit als Hauptursache für unsymmetrische Spuren anzusehen. Dieser Zusammenhang bietet die Möglichkeit einer prophylaktischen Kontrolle der Spursymmetrie. Im Bild 91 sind verschiedene Aufnahmen der koaxialen CMOS-Kamera mit stets gleicher Laserspotposition dargestellt. Der Rand der Pulverdüse, der den Bildausschnitt begrenzt, kann als Orientierung für den Pulverauffreffpunkt, der im Mittelpunkt des Kreises angesiedelt ist, genommen werden. Setzt man den bekannten Mittelpunkt der Laserstrahlung in Bezug zum Schwerpunkt des Pulverdüsensrandes, so erhält man die relative Abweichung der beiden Punkte.

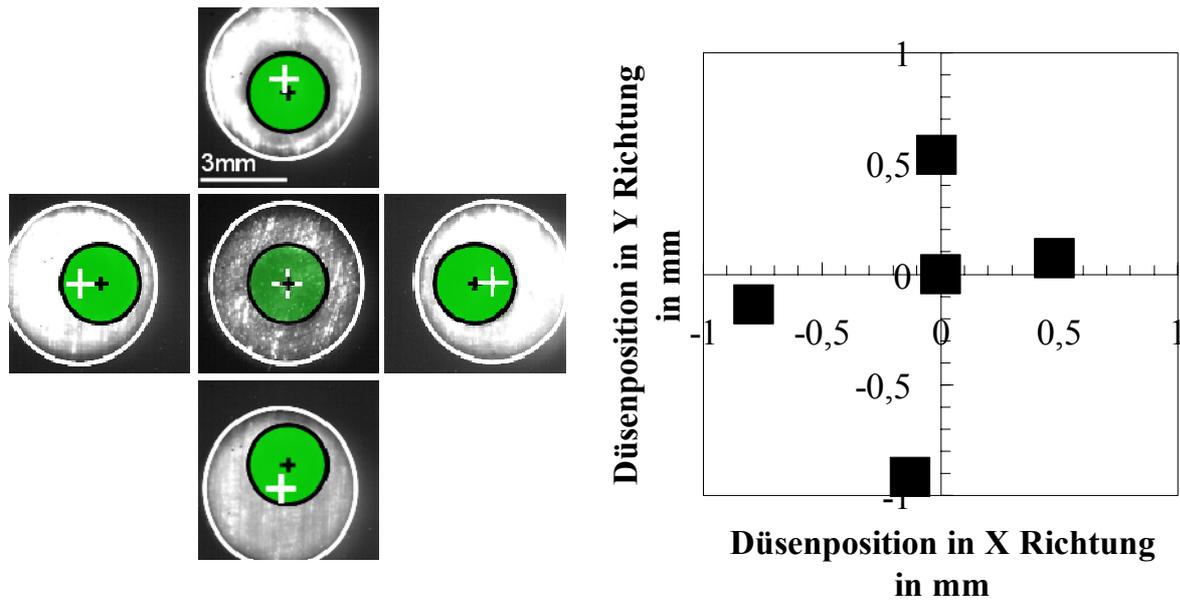


Bild 91: Prophylaktische Diagnose der Pulverdüsenverstellung als Ursache für unsymmetrische Beschichtungsspuren durch die Prozessüberwachungskamera.

Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit durch eine kurzzeitige Erhöhung der Belichtungszeit den Düsenrand zu erkennen, um so vor jedem Beschichtungsvorgang die Position der Pulverdüse zu prüfen. Damit kann die Produktion von unsymmetrischen Spuren und damit Bauteilausschuss vermieden werden. Zusätzlich zu dieser prophylaktischen und damit sehr wirtschaftlichen Methode besteht die Möglichkeit, die Emissionen im Prozess integral, wie in Bild 90 dargestellt, oder mit orts aufgelösten Sensoren zu erfassen um unsymmetrische Spuren zu identifizieren.

#### 4.2.6 Erkennung von mangelnder Schutzgaszufuhr

Der erforderlichen Schutzgasatmosphäre beim Laserstrahlbeschichten kommt zu gute, dass der Zusatzwerkstoff durch eine Trägergasströmung aus Schutzgas in die Wechselwirkungszone transportiert wird. Damit liegt bei erfolgreichem Pulvertransport eine Mindestmenge Schutzgas vor, die aber nicht ausreicht um Porenbildung zu verhindern. Bei den vorliegenden Untersuchungen umfasst die Trägergasströmung aus Argon einen Anteil von ungefähr dreißig Prozent der erforderlichen Schutzgasmenge. Der restliche Anteil wird über einen zusätzlichen Kanal im Zentrum der Pulverdüse zugeführt. Die Schutzgasströmung aus der zentralen Düsenöffnung hat Einfluss auf die

Pulvergasströmung, die aus dem umgebenden Ringkanal austritt. Lin [32] berichtet schon 1998 über eine Aufweitung des Pulveraustrittswinkels mit steigender Schutzgasströmung bei koaxialen Pulverdüsen. Die Auswirkung des Schutzgasstromes auf die Spurqualität, das Schmelzbad und die Prozessemissionen in der vorliegenden Arbeit decken sich mit der Aussage von Lin und lassen noch mehr Rückschlüsse zu. Eine sinkende Schutzgasatmosphäre führt zu erhöhter Rauch- und Rußbildung. Eine sichtbare Oxidationsreaktion wie beim Laserumschmelzen bleibt jedoch aus. Die Schutzgasmenge des Trägergasstromes scheint derartige Reaktionen zu verhindern. Je geringer und damit ruhiger die Schutzgasströmung ist, desto weniger Turbulenzen entstehen im Schmelzbad. Als Folge daraus bilden sich ein ruhiges Schmelzbad und eine gleichmäßige Beschichtungsraupe. Während eine gleichmäßige Spur hinsichtlich der Bearbeitungsqualität positiv bewertet wird, wirkt sich die erhöhte Porenhäufigkeit, speziell im Übergangsbereich zwischen Grund- und Beschichtungswerkstoff mit fallender Schutzgasmenge negativ aus. Der kleinere Austrittswinkel des Beschichtungspulvers als Folge der verringerten Schutzgasmenge bewirkt, dass die Pulverpartikel weniger gestreut und zentraler in der Wechselwirkungszone auftreffen. Das Schmelzbad wird kleiner und die Beschichtungsspur schmaler. In den CMOS-Aufnahmen aus Bild 92 ist die mit der Schutzgasmenge gleichsinnig fallende Schmelzbadfläche anhand der markierten Schmelzbadkante zu erkennen.

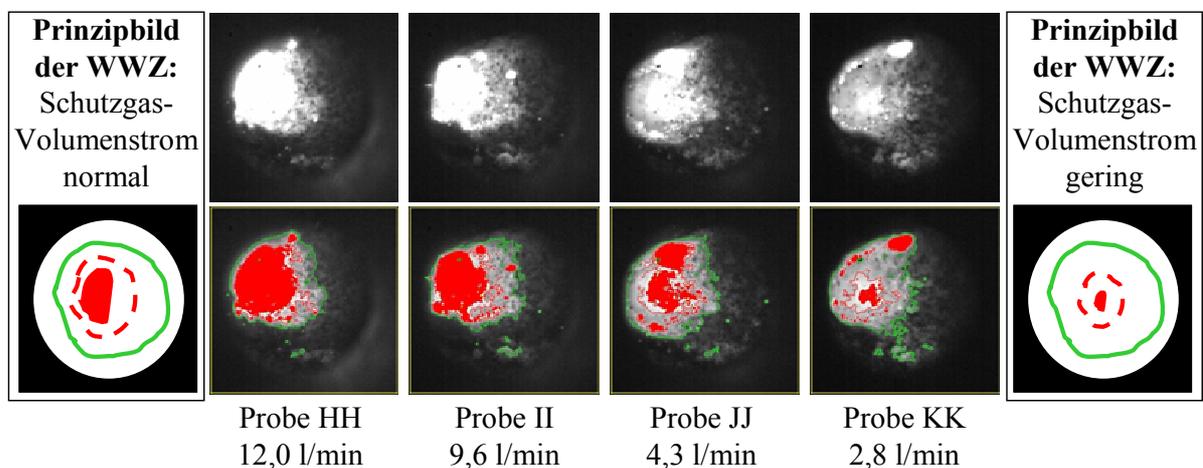


Bild 92: Auswirkungen einer fallenden Schutzgaszufuhr auf die Prozessemissionen. Dargestellt durch Prinzipbilder und Momentaufnahmen aus dem Prozess.

Die zwei Skizzen aus Bild 92 zeigen wie sich das Schmelzbad in Korrelation zur Markierung der Bearbeitungsdimension bei normaler und verringerter Schutzgasmenge verhält. Ein Verhältnis der Fläche der Bearbeitungsdimension zur Schmelzbad-

fläche, speziell im vorderen Bereich der Wechselwirkungszone, weil dieser störungsfreier ist, stellt den Indikator zur Erkennung der vorliegenden Schutzgasströmung dar. Bild 93 zeigt, dass der steigende Quotient der beiden Größen ein Signal für eine abfallende Schutzgasströmung ist. Dieser Indikator ist nicht in der Lage Poren innerhalb der Spur nachzuweisen. Der Indikator ist lediglich in der Lage eine abfallende Schutzgasmenge zu erkennen, die zu Rußbildung auf der Spur und Poren innerhalb der Spur führen kann. Bild 93 zeigt oben zwei Prozessverläufe mit normaler Schutzgaszufuhr und normalem Größenverhältnis der Bearbeitungsdimension zur Schmelzbadfläche, die im Querschliff keine Poren aufweisen. Die beiden Diagramme mit stark verringerter Schutzgasströmung zeigen in einem Großteil des Signalverlaufes ein erhöhtes Größenverhältnis und in den Querschliffen Poren im Übergangsbereich.

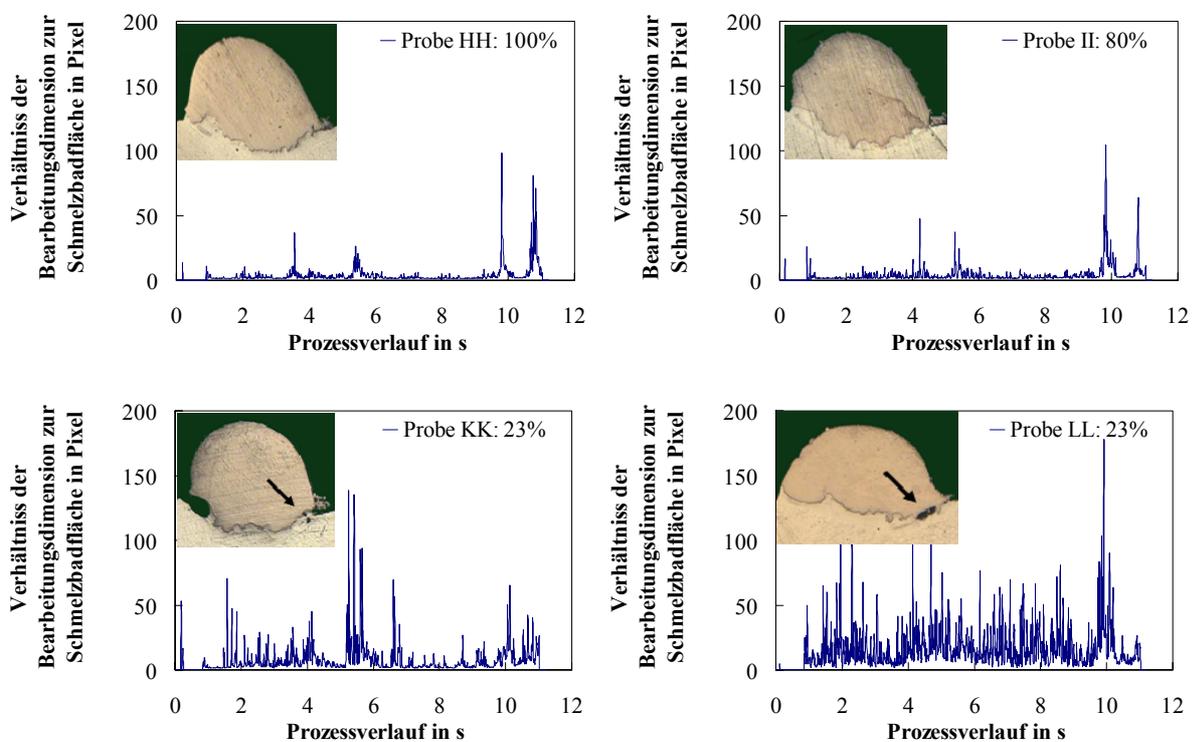


Bild 93: Kamerabasierte Diagnose einer fehlerhaften Schutzgasatmosphäre, die zu Porenbildung führen kann. Proben mit verringerter Schutzgaszufuhr (23% der normalen Schutzgasmenge) haben erheblich öfter Poren als Proben mit intakter Schutzgaszufuhr (im Bereich von 80% - 100% der normalen Schutzgasmenge).

Ein weiterer Effekt, der aber momentan nicht zur Erkennung von Schutzgasfehlern genutzt wird, sind unregelmäßig auftretende Unschärfefeffekte in den Kamera-sequenzen. Über kleinere Anteile im Prozessverlauf wird das CMOS-Bild unschärfer, was der erhöhten Rauchbildung angelastet wird.

### 4.2.7 Erkennung von Rissen

Beim Laserstrahlbeschichten, einem thermisch induzierten Prozess, können durch unterschiedliche lokale Ausdehnungen in den behandelten Schichten Eigenspannungen auftreten. Unter Eigenspannungen versteht man Spannungen in einem Bauteil, die ohne Einwirkung von äußeren Kräften und Momenten vorliegen [1]. Ein komplexes Zusammenspiel des vom Laserstrahl erzeugten Temperaturfeldes und der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe ist für die Ausbildung der Eigenspannungen verantwortlich [93]. Zugeigenspannungen neigen dabei mehr zu Rissbildung als Druckeigenspannungen [10]. Die Risse entstehen beim Entladen der Eigenspannungen. Um Risse zwischen Grund- und Beschichtungswerkstoff, ein Ablösen der Beschichtung, zu vermeiden, müssen die Wärmeausdehnungskoeffizienten des Grund- und Beschichtungswerkstoffes aufeinander abgestimmt sein. Durch die Abstimmung entstehen bei den Aufheiz- und Abkühlvorgängen weniger Spannungen und Scherkräfte. Weiterhin muss eine gewisse Duktilität des Beschichtungswerkstoffes gegeben sein, um Risse innerhalb der Beschichtung als Folge des thermischen Schrumpfens zu vermeiden. Aber auch in gut abgestimmten Werkstoffsystemen besteht Rissgefahr speziell dann, wenn die Verbindungszone zwischen Grund- und Schichtwerkstoff nicht entsprechend ausgeprägt ist. Die hier untersuchten Risse wurden durch Variationen der Laserleistung und der Pulverfördermenge provoziert. Bild 94 zeigt zwei Proben mit verschiedenen Rissarten, die aus hohen Aufmischungen resultieren. Einmal ein Längsriss am Spuranfang von Probe CC, der sich an der Übergangszone zwischen Beschichtungswerkstoff und Grundwerkstoff ausgebildet hat und damit die Spur vom Grundwerkstoff ablöst. Ein anderes Rissbild zeigt der Querriss von Probe DD. Hier haben sich Spannungen aufgrund der Versprödung der Spur durch eine zu hohe Aufmischung innerhalb der Spur ausgebildet, die zu einem Zerreißen der Spur geführt haben. Nach [94] nimmt die Rissbildung ab einer Aufmischung von 15% zu.

Eine andere Ursache, die zu Rissen führen kann, ist eine Verschmutzung der Bauteiloberfläche z.B. durch Kühlschmiermittel aus der Vorbearbeitung. Das Kühlschmiermittel verdampft und verbrennt während des Beschichtungsprozesses und kann so zu Gasporen in der Beschichtung führen. Diese Gasporen sind Schwächungen im Beschichtungsgefüge, die dann den normalen, beschichtungsbedingten Eigenspannungen nicht mehr standhalten und zu Rissen führen.

Wie Bild 94 zeigt handelt es sich hierbei um sehr feine Risse, die unter einem Stereomikroskop identifiziert werden können und große Auswirkung auf die Bearbeitungsqualität haben.

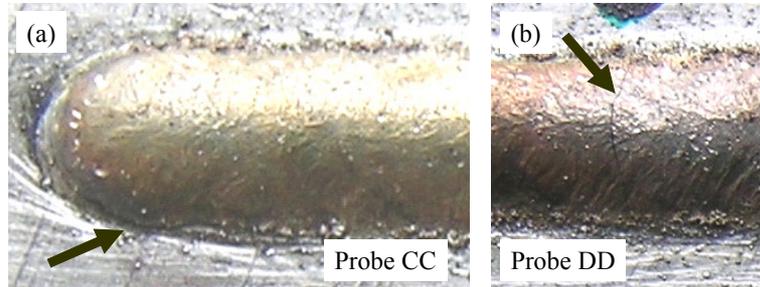


Bild 94 Beschichtungsspur mit (a) Längsriss und (b) Querriss.

Da Risse vorwiegend von der Aufmischung abhängen, liegt der Schluss nahe, Risse über die Aufmischung zu detektieren. Bild 95 zeigt, dass sich Spuren mit Rissen durch eine hohe Aufmischung identifizieren lassen. Allerdings haben Spuren mit hoher Aufmischung nicht zwingend Risse. Damit ist eine zuverlässige Bewertung der Risse durch die Aufmischung nicht möglich, sondern es können nur potentiell rissgefährdete Spuren erkannt werden.

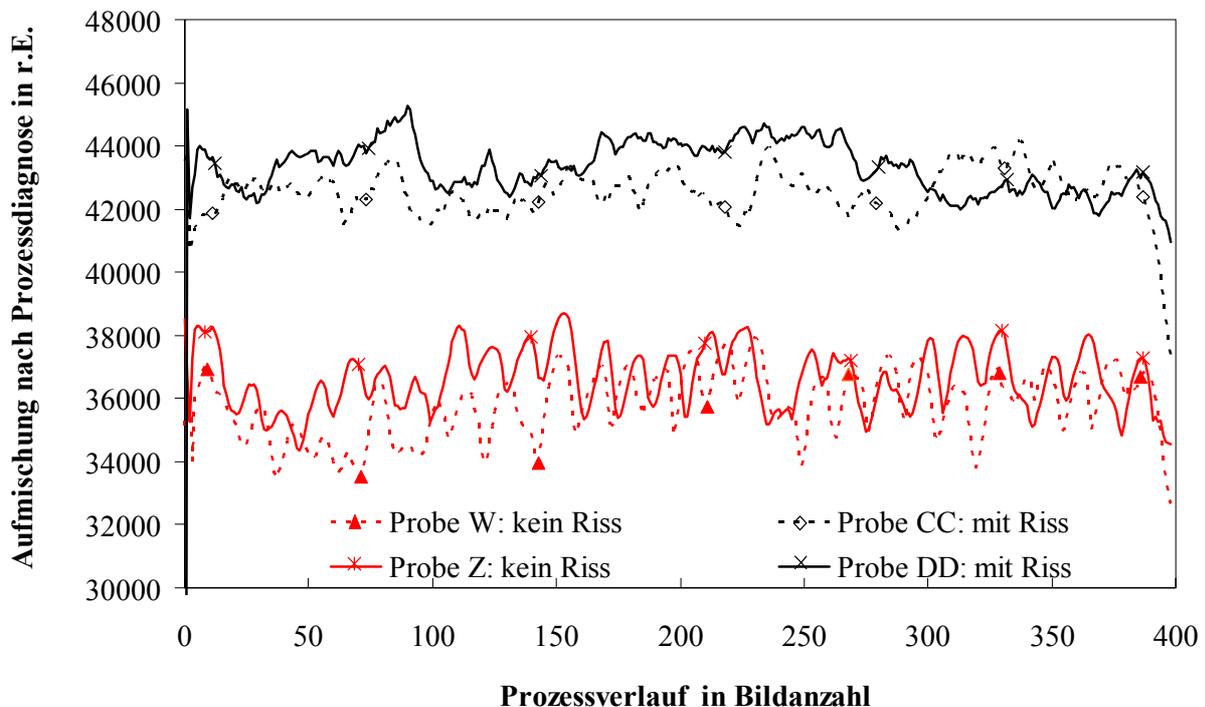


Bild 95: Kamerabasierte Diagnose von rissgefährdeten Spuren durch Erkennung von Aufmischungsfehlern als eine Ursache für Risse.

Der Zeitpunkt der Rissentstehung spricht ebenfalls gegen die Erkennung der Risse durch eine Online-Kameraüberwachung. Risse können beim Erstarren und Abkühlen der Spur bis zu fünfzehn Sekunden nach dem eigentlichen Beschichtungsprozess entstehen. Da die Spannungsentladungen, die zu Rissen führen, zum Teil mit dem menschlichen Ohr hörbar sind, liegt der Schluss nahe, die Rissentstehung mit einem Schallsensor zu detektieren. Die Störgeräusche der Laboranlage haben sich bei einer Luftschallanalyse derart negativ auf die Erkennungsleistung ausgewirkt, dass die Luftschallanalyse in einer Produktionsumgebung als kritisch betrachtet wird und der Weg über die Körperschallmessung verfolgt wurde. Nachteil der Körperschallmessung ist, dass der berührende Kontakt zwischen Sensor und Bauteil bis zu fünfzehn Sekunden nach Beschichtungsende vorhanden sein muss. Diese fünfzehn Sekunden sind eine Richtgröße für den vorliegenden Versuchsaufbau und müssen wegen bauteilabhängiger Wärmeleitungsvorgänge für jede Anwendung gesondert definiert werden. Das Messprinzip ist ausreichend robust, so dass der Sensor an einer beliebigen Stelle am Bauteil angebracht werden kann und unter den Störeinflüssen einer Laboranlage unempfindlich auf andere Schallquellen wie Roboterbewegungen oder arbeitsbedingte Erschütterungen in unmittelbarer Umgebung reagiert. Damit ist es möglich an einem Bauteil, an dem mehrere Beschichtungsvorgänge stattfinden, diese in der normalen Taktzeit durchzuführen und erst nach der letzten Beschichtung die erforderlichen fünfzehn Sekunden zu warten. Der Riss kann zwar nicht mehr genau einer Beschichtung zugeordnet werden, aber die Messzeit von fünfzehn Sekunden im Nachgang muss nur einmal aufgewendet werden.

Bild 96 zeigt die Überwachung von rissfreien Proben. Dabei sind durch hohe Signalverstärkung auf der oberen Messkurve die Geräusche, die der Beschichtungsvorgang samt Roboterbewegung und restlicher Anlagengeräusche entwickelt, aufgetragen. Die Signalverstärkung, die zur Rissüberwachung geeignet ist, zeigt, dass mit diesem Verstärkungsfaktor keine Störgeräusche erkannt werden und rissfreie Spuren keinen Ausschlag im Signal haben. Bild 97 zeigt dagegen verschiedene Ausschläge. In diesem Diagramm sind die rissfreien Proben aus Bild 96 zusammen mit Proben, die einen oder mehrere Quer- oder Längsrisse, haben aufgetragen. Während im Diagramm rissfreie Proben keine Ausschläge aufweisen und auch keine Störeffekte der Anlage im Messsignal sind, zeigt sich jeder Riss durch eine erkennbare Spannungsentladung.

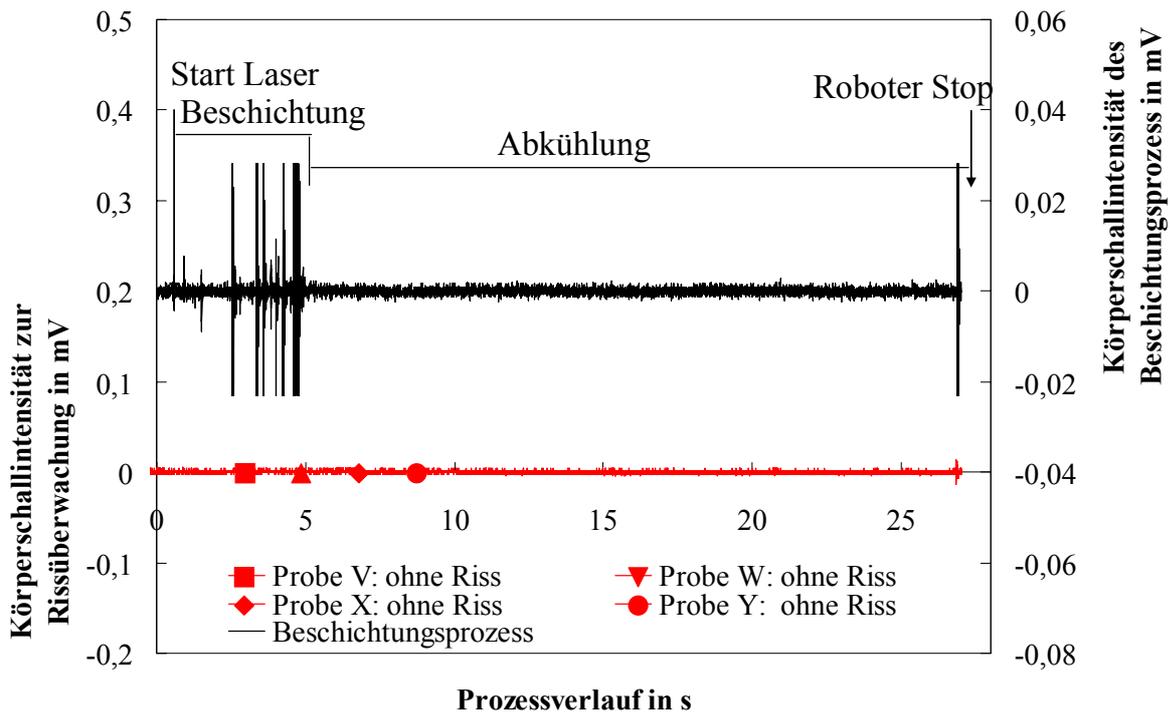


Bild 96: Darstellung der Anlagengeräusche durch einen Körperschallsensor mit hohem Verstärkungsfaktor (obere Kurve). Ausschlagfreie Signalverläufe von rissfreien Proben bei angepasstem Verstärkungsfaktor (untere Kurven).

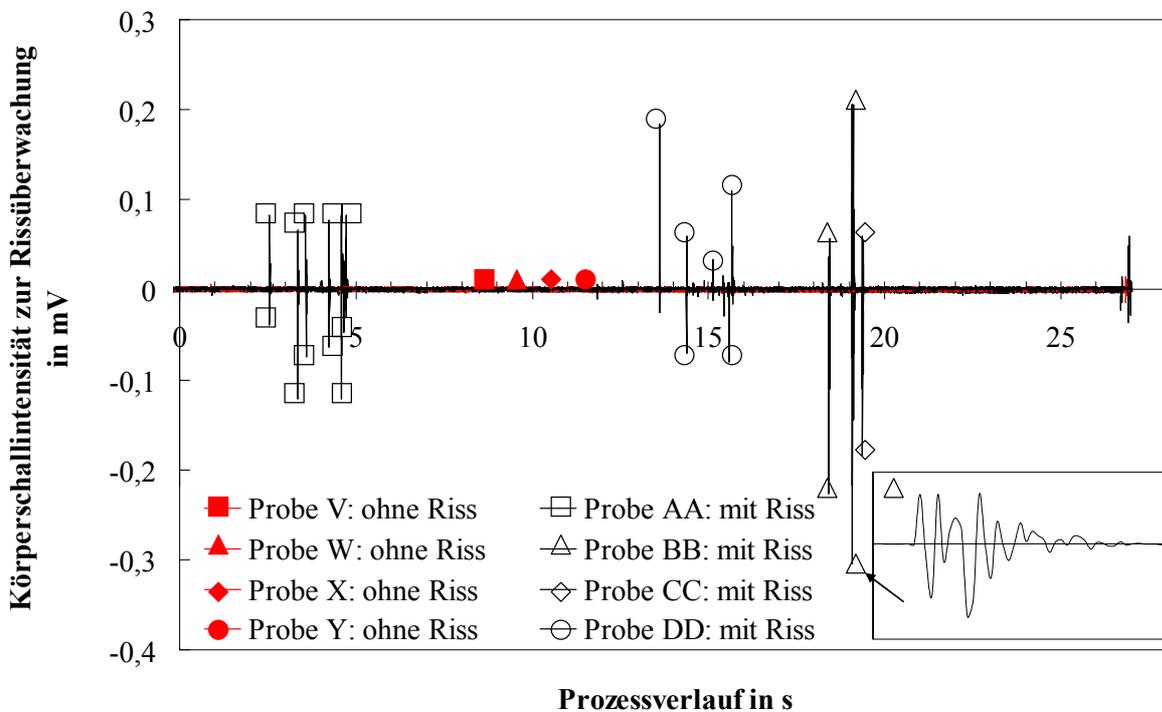


Bild 97: Diagnose von Beschichtungsspuren mit Rissen durch den Körperschallsensor mit einer hohen Trennschärfe zu den rissfreien Proben aus Bild 96.

Die Diagramme zeigen, dass eine Erkennung von Rissen durch die Messung der Spannungsentladungen ein zuverlässiges und gegen prozessbedingte Störgrößen unempfindliches Verfahren ist. Es ist möglich, bei einer Bearbeitung unter Laborbedingungen sicher nachzuweisen, ob eine Probe rissfrei ist oder Risse aufweist. Beim momentanen Stand ist es nicht möglich, die Art der Risse (Längs- oder Querrisse) zu unterscheiden oder die exakte Anzahl der Risse zu bestimmen. Um die Risserkennung stabiler gegen produktionsbedingte Störquellen zu machen und um eventuell eine Rissklassifizierung durchführen zu können, besteht die Möglichkeit die Frequenzen der Spannungsentladungen mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) zu bestimmen. Mit Kenntnis der entsprechenden Frequenzen kann das Messsignal zusätzlich zur bestehenden Intensitätsbewertung noch hinsichtlich der Schalleigenschaft bewertet werden.

## **5 Prozessüberwachung beim Laserstrahlumschmelzen und –beschichten**

Ein Prozessüberwachungssystem für Laserumschmelz- und Beschichtungsverfahren besteht nicht nur aus den oben vorgestellten Indikatoren, sondern beinhaltet eine Mess- und Auswertestrategie sowie eine Schnittstelle zum Anlagenbediener. Die Mess- und Auswertestrategie legt Prüfabfolgen und Prüfzeitpunkte fest, an denen bestimmte Qualitätsmerkmale überwacht werden. Bei einer Online-Prozessdiagnose wird die Vielzahl an Messungen während der Bearbeitung durchgeführt. Es gibt aber auch Qualitätsgrößen, deren Messsignale unmittelbar vor oder nach der Bearbeitung erfasst werden. Die Auswertestrategie ist im Gegensatz zur Messstrategie komplexer, da hier festgelegt wird, nach welcher Reihenfolge die Qualitätsmerkmale bewertet werden. Ein Fehler in einem Qualitätsmerkmal kann die Prozessemissionen soweit verändern, dass dies bei der Prüfung weiterer Qualitätsmerkmale berücksichtigt werden muss bzw. eine weitere Prüfung entfällt, weil das fehlerhafte Qualitätsmerkmal zu einem Bauteilfehler führt und ausgeschleust werden muss. Die Schnittstelle zum Menschen (HMI human-machine-interface) besteht in einer Bedieneroberfläche, auf deren Layout in dieser Arbeit nicht eingegangen wird, mit einer Messdatenvisualisierung sowie einer Prozessbewertung und im Fall eines fehlerhaften Prozesses soweit möglich einer Fehlerklassifizierung und Hilfestellung zur Problemlösung.

### **5.1 Signalverarbeitung und –filterung**

Das Aufbereiten und Filtern von Messsignalen ist eine Gratwanderung zwischen Informationsverlust und der Vorverarbeitung von unübersichtlichen Messsignalen zu aussagekräftigen und interpretierbaren Messkurven. Aus diesem Grund und aus der Aufgabenstellung heraus, ein echtzeitfähiges Online-Prozessdiagnosesystem zu entwickeln, wurde in dieser Arbeit versucht, nur ein unbedingt notwendiges Maß an Signalverarbeitungsaufwand einzusetzen. Abhängig von der Prozessdynamik, der

Abtastfrequenz des Sensors und der Messdatenentstehung wurde bedingt Signalvorverarbeitung eingesetzt. Da die Wechselwirkungsdynamik beim Umschmelzprozess wenig Rauschen und Unruhe im Messsignal und im Prozessergebnis erzeugt, bietet das Laserstrahlumschmelzen die Option auf Signalverarbeitung und -filterung zu verzichten. Dies wurde in vorliegender Arbeit bei der Auswertung der Kameradaten umgesetzt. Liegt die Abtastfrequenz des Sensors weit über der Prozessdynamik, wie das z.B. bei den Infrarot- und Rückreflex-Detektoren mit 1000Hz der Fall ist, macht es Sinn das Sensorsignal durch Filterung zu glätten. Dieser Vorgang ist sinnvoll, um spontane Effekte aus der Wechselwirkungszone ohne Auswirkung auf den trägen Umschmelzprozess nicht zu bewerten. Alle abgebildeten Signalkurven des Infrarot- und Rückreflexensors werden schon im LaserWeldingMonitor mit einem Software-Tiefpassfilter geglättet. Bei der Messkurvenentwicklung aus den Bildsequenzen der CMOS-Kamera mittels Bildverarbeitungsroutinen überlagern sich beim Laserbeschichten zwei Effekte, die eine Signalverarbeitung und Filterung erforderlich machen. Einerseits ist der Beschichtungsprozess mit seinen geringfügigen aber zahlreichen und schnellen Änderungen in den Prozessemissionen dynamischer als das Laserstrahlumschmelzen. Andererseits verursacht die kontrastabhängige Schmelzbadranderkennung ein Rauschen im Signal und vereinzelt Erkennungsausfälle der Schmelzbadkante. Die Signalaufbereitung verläuft nach den nachfolgend dargestellten Schritten zur Korrektur von Erkennungsausfällen und dem Einsatz eines Tiefpassfilters zum Glätten der Messkurve. Der Ablauf wurde in dieser Arbeit bedarfsorientiert nur beim Laserbeschichten eingesetzt, ist aber auf andere Anwendungen übertragbar.

### 5.1.1 Korrektur von Unregelmäßigkeiten der Bildanalyse

Beim Erkennen und Markieren von Geometrien, basierend auf Graustufenschwellenwerten und Graustufengradienten, durch die Bildverarbeitung können Erkennungsdefizite auftreten. Sind die im Vorfeld parametrisierten Bedingungen zur Erkennung des Schmelzbadrandes und der Bearbeitungsdimension nicht erfüllt, wird diese Geometrie als nicht vorliegend gewertet. Mit bisherigen Kenntnissen über den Beschichtungsprozess kann angenommen werden, dass bei Messkurven wie in Bild 98 bei der innerhalb von 15ms bei einer von drei Momentaufnahmen der Schmelzbadrand nicht erkannt wird, dass er dennoch vorliegt. Wird eine Geometrie in wenigen Momentaufnahmen nicht erkannt, was nicht auf das Vorliegen eines Prozessfehlers deutet, soll die von der Bildverarbeitung bewertete Null in den Signalwerten durch einen

Erfahrungswert eines definierten Zeitbereiches unmittelbar davor ersetzt werden. Eine falsch bestimmte Null sollte korrigiert werden damit die später gefilterte Kurve nicht verfälscht wird und die Messkurve übersichtlich bleibt. Bild 98 zeigt beispielhaft den Verlauf des Schmelzbad Schwerpunktes, den Indikator für die Spurhöhe, mit einer ungewöhnlich hohen Anzahl an nicht erkannten Schmelzbadrändern. Dies ist an den Sprüngen der Kurve auf der X-Achse erkennbar.

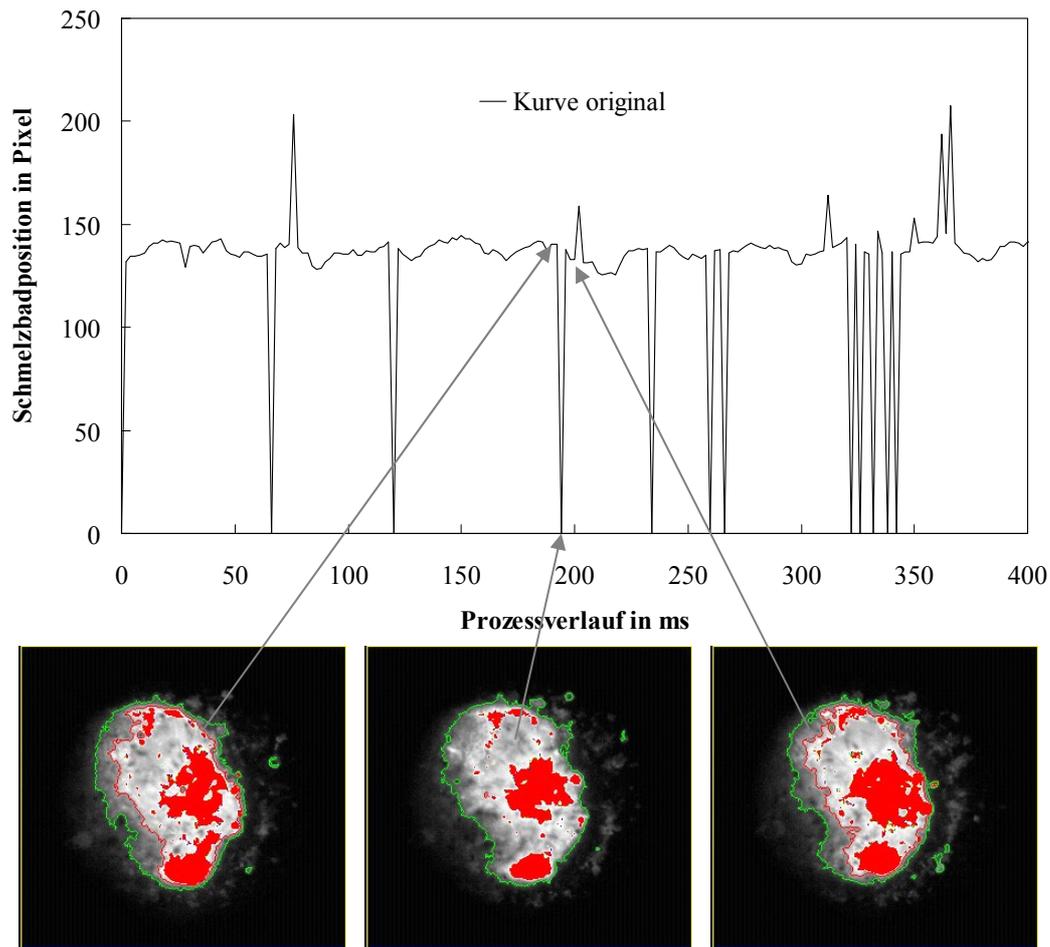


Bild 98: Momentaufnahmen und Messsignalverlauf der Prozessüberwachungskamera mit Erkennungsausfällen der inneren Geometrie des Schmelzbadrandes.

Um Erkennungsfehler zu identifizieren wird ein Toleranzbereich um die Sollkurve erzeugt. Dieser Toleranzbereich wird typischerweise durch eine geeignete Anzahl an Referenzprozessen, um die der Toleranzschlauch gelegt wird, erzeugt.

Ein anderes Verfahren, das nicht durch Referenzprozesse eingelesen werden muss, aber nur für kontinuierliche Prozesse ohne signifikante Änderungen während des Prozesses geeignet ist, zeigt Bild 99a. Zunächst wird ständig ein fortlaufender Mittelwert aus

den Signalwerten eines konstanten Zeitraums davor gebildet. Im dargestellten Fall besteht der Mittelwert aus den Messdaten der 250ms unmittelbar davor. Am Prozessstart ist diese Mittelwertbildung so nicht möglich, da noch nicht ausreichend Messwerte zur Verfügung stehen. Hier wird eine Mittelwertbildung anhand der verfügbaren Daten eingesetzt. Der Toleranzbereich wird durch ein parametrisiertes Vielfaches der Standardabweichung der Messdaten, ebenfalls eines konstanten Zeitraumes im Vorfeld (250ms) um den Mittelwert, gebildet. Vorteil eines solchen Toleranzbereiches ist:

- Kein Einlernaufwand für gemittelte Referenzkurven.
- Automatische Anpassung des Toleranzbereiches an beliebige Kurvenniveaus durch Toleranzbandauslegung auf Basis der Messdaten des aktuellen Prozesses.
- Automatische Anpassung der Toleranzbreite an die Signalunruhe durch die Auslegung der Toleranzbandbreite auf Basis der Standardabweichung des aktuellen Prozesses.

Nachteil dieser Methode ist, dass Sprünge im Messsignal durch die verzögert wirkende Mittelwert- und Standardabweichungsbildung falsch interpretiert werden können. Es muss im Vorfeld der Zeitraum der Mittelwertbildung auf die Änderungen im Messsignal angepasst werden. Dies ist nur bis zu einem Minimalzeitraum, der vom Messsignal abhängig ist, möglich.

Sind die Erkennungsausfälle identifiziert, werden sie durch den schon berechneten Mittelwert für diese Momentaufnahme ersetzt. Da die Mittelwerte aus Erfahrungswerten des aktuellen Prozesses bestehen, ist es möglich die Signalkurve sehr prozessnah zu korrigieren. Wie nahe die auf diese Weise entstehende Kurve einer gedachten Kurve ohne Erkennungsausfälle ist, zeigt Bild 99b.

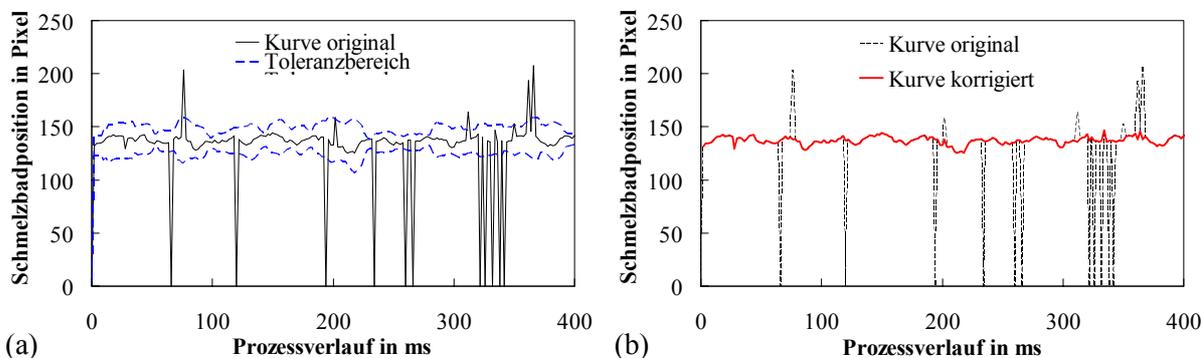


Bild 99: (a) Darstellung des automatisiert erstellten Toleranzbandes um den aktuellen Mittelwert des Signalverlaufes. (b) Neuer Signalverlauf mit korrigierten Erkennungsausfällen im Vergleich zur Originalkurve.

### 5.1.2 Filterung der Messkurve

Die Filterung der Messkurve, die im Wesentlichen aus einer Glättung besteht, wird vorwiegend für eine bessere Visualisierung derselben eingesetzt. Der Einfluss der Signalunruhe auf die Ergebnisbewertung wirkt sich deutlich geringer aus als die erschwerte Interpretierbarkeit der unübersichtlichen Kurven auf den Menschen. Da die Signalverläufe aufgrund der Prozessdynamik im höher frequenten Bereich geglättet werden sollen, wird ein Tiefpassfilter erster Ordnung eingesetzt, der ähnlich wie der Kondensator in einem elektrischen Stromkreis aus Bild 100 wirkt. Ein Kondensator, der im Tiefpassfilter zusammen mit dem Ohmschen Widerstand der Zeitkonstante  $T$  entspricht, wird einer sprunghaften Spannungsänderung ausgesetzt und gibt diese gedämpft weiter. Eine Spannungsänderung an einen Kondensator führt zu einer Veränderung seiner Ladung abhängig von der Kapazität. Dadurch führen hochfrequente Änderungen der Eingangsspannung zu Lade- und Entladevorgängen des Kondensators aber haben nur geringe bzw. verzögerte Auswirkungen auf die Spannung im Stromkreis.

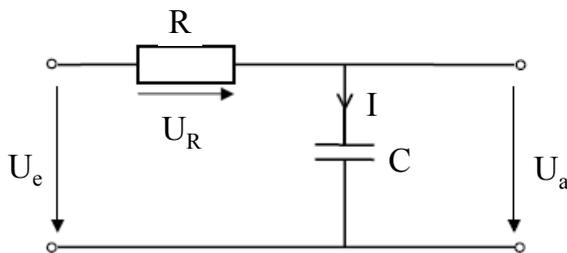


Bild 100 Prinzipskizze zu elektrischem Tiefpassfilter.

Der Strom  $I$  im Stromkreis aus Bild 100 und die Spannung  $U_R$  am Ohmschen Widerstand werden nach Gl.5.1 und Gl. 5.2 berechnet

$$I = C \cdot \frac{dU_a}{dt} \quad (5.1)$$

$$U_R = R \cdot I = R \cdot C \cdot \frac{dU_a}{dt} \quad (5.2)$$

Nach der Kirchhoffschen Maschengleichung kann Gl.5.3 und die lineare, inhomogene Differentialgleichung 1. Ordnung, Gl.5.4, mit konstanten Koeffizienten aufgestellt werden.

$$U_e = U_a + U_R \quad (5.3)$$

$$U_e = U_a + R \cdot C \cdot \frac{dU_a}{dt} \quad (5.4)$$

Mit der Zeitkonstante T, die das Produkt aus dem Widerstand R und der Kapazität C des Kondensators ist, kann aus der Differentialgleichung die Übertragungsfunktion Gl.5.5 gebildet werden.

$$G(j\omega) = \frac{U_a(j\omega)}{U_e(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega T} \quad (5.5)$$

Die obere Grenzfrequenz wird  $\omega_0=1/T$  und ist direkt abhängig von der Kapazität des Kondensators. Für die Sprungantwort lautet die zugehörige Differentialgleichung nach Gl.5.6:

$$U_e(t) = U_a(t) + T \cdot U'_a(t) \quad (5.6)$$

Um Ergebnisse im diskreten Zeitmaßstab zu erhalten, kann Gl.5.7 bzw. die nach dem Ausgangswert aufgelöste Gl.5.8 eingesetzt werden.

$$U_{e,n} = U_{a,n} + \frac{T}{\Delta t} \cdot (U_{a,n+1} - U_{e,n}) \quad (5.7)$$

$$U_{a,n+1} = U_{a,n} + \frac{\Delta t}{T} \cdot (U_{e,n} - U_{a,n}) \quad (5.8)$$

Über die Zeitkonstante T ist es möglich den Grad der Filterung so zu steuern, dass nur soweit geglättet wird, dass die Kerninformationen erhalten bleiben. Als Beispiel wird in Bild 101 die in Kapitel 5.1.1 ausreißerkorrigierte Kurve mit einer Zeitkonstante von 250ms geglättet. Der Vergleich der vorverarbeiteten und gefilterten Kurve zur Rohsignalkurve zeigt als Resultat eine übersichtliche Kurve, die Tendenzen im Prozess klar erkennen und interpretieren lässt.

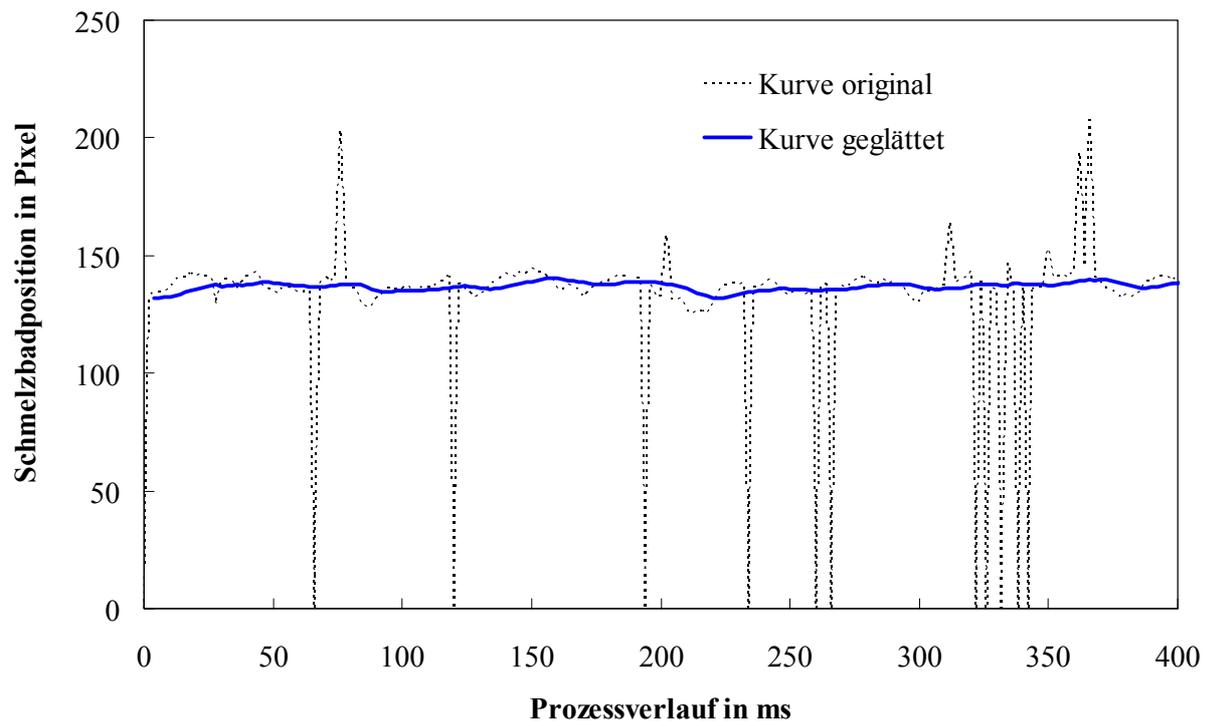


Bild 101: Vergleich der originalen Messkurve zu einer ausreißerkorrigierten und mit einem Tiefpassfilter geglätteten Kurve.

## 5.2 Messstrategie zum Laserstrahlumschmelzen

Die umfassende Bewertung eines Umschmelzvorganges fordert eine zeitliche und inhaltliche Abfolge von Mess- und Auswerteschritten. Diese Struktur ist nötig, weil einerseits Prüfschritte nur zu bestimmten Prozesszeiten durchgeführt werden können, und andererseits Prüfschritte auf die Ergebnisübergabe vorheriger Analysen angewiesen sind. Bild 102 zeigt sowohl die für die Online-Prozessdiagnose nötige Datenerfassung als auch die Abfolge der Auswertestufen bis zur Gesamtprozessbewertung.

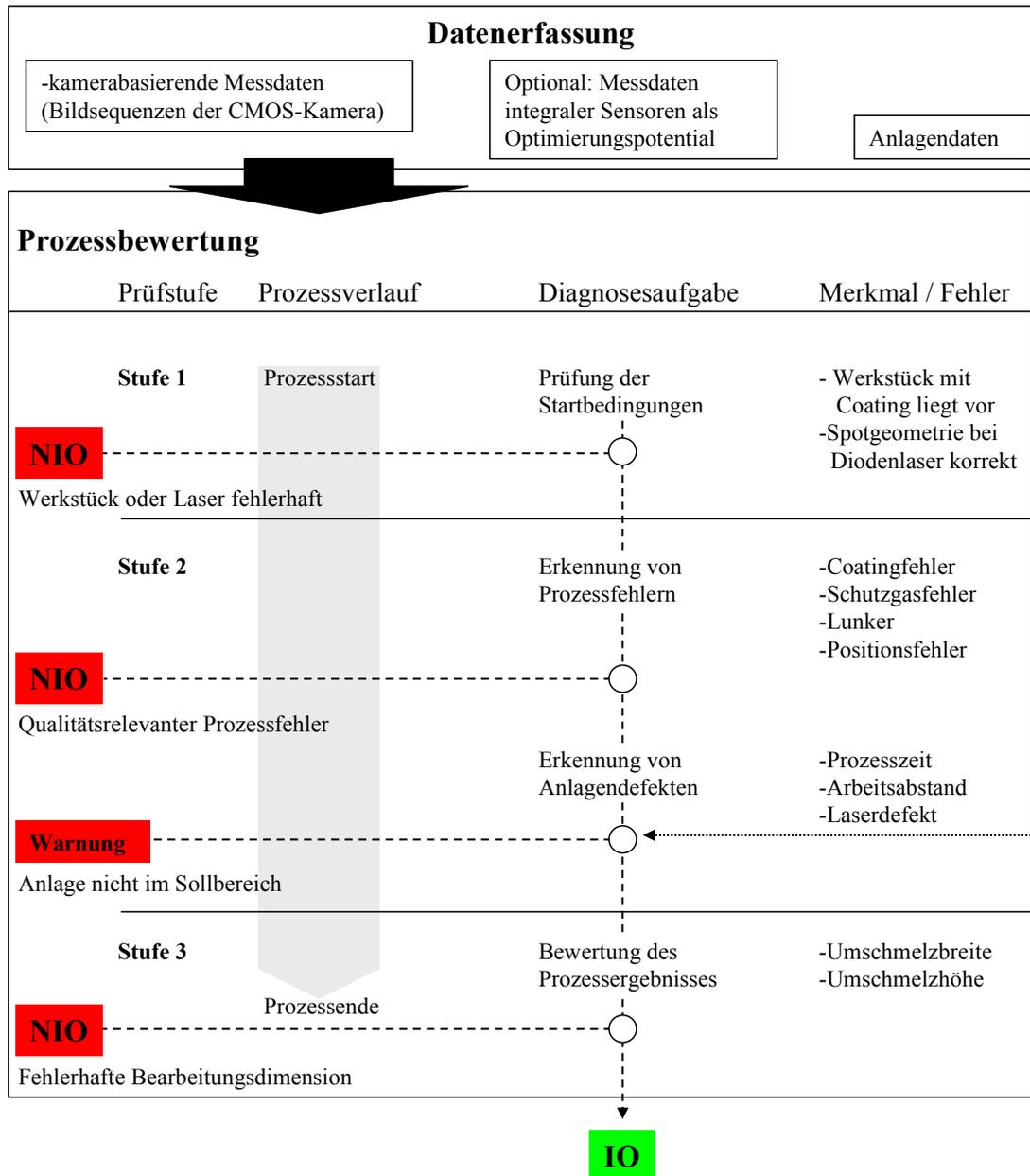


Bild 102: Mess- und Auswertestrategie zum Laserstrahlumschmelzen.

### 5.2.1 Datenerfassung

Als Sensorik zum Erfassen von Emissionen aus der Wechselwirkungszone wird auf Basis der durchgeführten Untersuchungen eine koaxial zum Strahlengang installierte CMOS-Kamera empfohlen. Die getesteten integralen Sensoren konnten im direkten Vergleich bezüglich Erkennungsvielfalt und Trennschärfe keinen Mehrwert

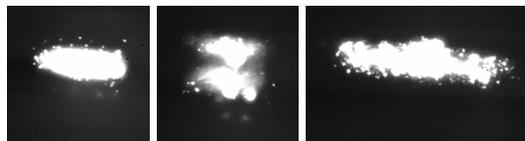
nachweisen. Die Kombination aus orts aufgelösten Sensoren und Punktdetektoren kann als optimierte Sensorik eingesetzt werden, um mögliche Qualitätsgrößen kameraunabhängig redundant zu überwachen, da die Störkontur durch integrale Sensoren an der Bearbeitungsoptik nur geringfügig anwächst. Die von der Anlagensteuerung verfügbaren Informationen wie z.B. Soll-Laserleistung, Soll-Vorschub oder Soll-Bearbeitungszeit sollten genutzt werden um durch einen Abgleich mit Messdaten eventuelle Prozessfehler und deren Ursachen ermitteln zu können.

### 5.2.2 Prüfung der Startbedingungen (Prüfstufe 1)

Am Prozessstart, unmittelbar nach dem Auftreffen der ersten Photonen in der Wechselwirkungszone, werden diese absorbiert und erwärmen die Oberfläche, die dann ihrerseits wieder emittiert. Zu diesem Zeitpunkt ist das Coating noch vollständig vorhanden und die Wechselwirkungszone strahlt über den gesamten Laserstrahlbereich nach der Intensitätsverteilung des Lasers. Dieses Emissionsbild am Prozessbeginn gibt unter anderem Aufschluss über die Coatingart oder eine falsch justierte Laserspotform bzw. Intensitätsverteilung.

- Erkennung von fehlendem oder falschem Coating über die erkannte Intensität der Wechselwirkungszone siehe Kapitel 4.1.4.2
- Ist die Strahlformung oder die Intensitätsverteilung nicht korrekt (siehe Bild 103), ist das im Momentbild erkennbar und mittels Bildauswertung durch Geometrie- und Schwerpunktanalyse auswertbar.

Kamerabilder der Wechselwirkungszone unmittelbar nach Prozessstart



Breite (Dimension X in Pixel)	293	246	453
Höhe (Dimension Y in Pixel)	140	218	137

Bild 103: Beispiele für verschiedene Spotformen mit zugehöriger Analyse der Wechselwirkungszone in Höhe und Breite.

### 5.2.3 Erkennung von Prozessfehlern (Prüfstufe 2)

Fehler während des Prozesses, verursacht durch Unregelmäßigkeiten im und auf dem Grundwerkstoff, Fehler in der Schutzgaszufuhr und Fehler in der Positionierung der Wechselwirkungszone auf dem Grundwerkstoff werden durch die vorgestellten Indikatoren erkannt:

- Beschädigungen des Coatings: siehe Kapitel 4.1.4.1
- Mangelnde Schutzgaszufuhr: siehe Kapitel 4.1.5
- Fehlstellen im Grundwerkstoff: siehe Kapitel 4.1.6
- Positionierfehler: siehe Kapitel 4.1.7

Hier gilt es eine Trennung zwischen qualitätsmindernden Prozessfehlern und vorhandenen aber das Prozessergebnis nicht einschränkenden Prozessfehlern vorzunehmen. Das Online-Prozessdiagnosesystem ist abhängig von Prozessfehlern in der Lage Fehler zu erkennen, die das Prozessergebnis noch nicht in seiner Funktionsfähigkeit einschränken. Solche Prozesse werden als Gut-Prozesse bewertet, die Informationen können jedoch bezüglich eines sich anbahnenden Anlagendefektes oder kritischer Bauteilchargen als Warnung ausgegeben werden.

### 5.2.4 Erkennung von Anlagendefekten (Prüfstufe 2)

Anlagendefekte stehen im direkten Zusammenhang mit verminderter Bearbeitungsqualität, die nach Kapitel 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 und 5.2.5 kontrolliert wird. Eine Überwachung von Anlagendefekten ermöglicht die Ursachenforschung und kann ggf. Warnungen über eine zu erwartende Anlagenfehlfunktion ausgeben. Zur Kontrolle der Anlagenfunktion ist im Gegensatz zur Prozessqualität die Kenntnis des Anlagensollwertes zum Vergleich der Messwerte nötig. Im Folgenden sind Beispiele möglicher Überwachungsstrategien aufgezeigt:

- Kontrolle der Prozesszeit. Das Verhältnis der gemessenen Zeit zur Sollbearbeitungszeit stellt ein simples Beispiel einer Anlagenkontrolle dar.

- Positionierfehler innerhalb der Bauteilebene (X, Y) werden nach Kapitel 4.1.7 erkannt, da dadurch die Funktionsfähigkeit der umgeschmolzenen Spur nicht mehr gegeben ist. Durch Bauteilchwankungen, Einlegefehler oder falsche Roboterbahnen kann ebenfalls ein Positionierfehler zwischen Werkstückoberfläche und Optik (Z-Ebene) auftreten. Eine veränderte Brennfleckgröße und Energiedichte mit möglichen Auswirkungen auf Umschmelzbreite und –tiefe ist die Folge des falschen Arbeitsabstandes. Ein erkannter fehlerhafter Arbeitsabstand ist kein Qualitätsmerkmal, sondern erklärt lediglich die Ursache einer falschen Umschmelzdimension und kann so dem Anlagenbediener bei der Problemlösung helfen. Zur Erkennung von Fehlern im Arbeitsabstand wird die Brennfleckgröße in Kombination mit der Brennfleckposition analysiert. Durch einen veränderten Arbeitsabstand ändert sich die Laserstrahlfläche und damit auch die emittierende Brennfleckgröße. Der Brennfleckschwerpunkt bleibt davon unberührt. Korreliert man die Schwerpunktposition in Vorschubrichtung eines normalen Umschmelzprozesses mit einem Prozess mit einer Rampe im Arbeitsabstand (Fokusrampe), erhält man einen identischen Verlauf für den Schwerpunkt wie Bild 104 zeigt. Ein geringer Arbeitsabstand verringert aufgrund des Strahlverlaufes die Brennfleckgröße, die vom Prozessüberwachungssystem im Vergleich zu einer normalen Spur unterschieden wird.

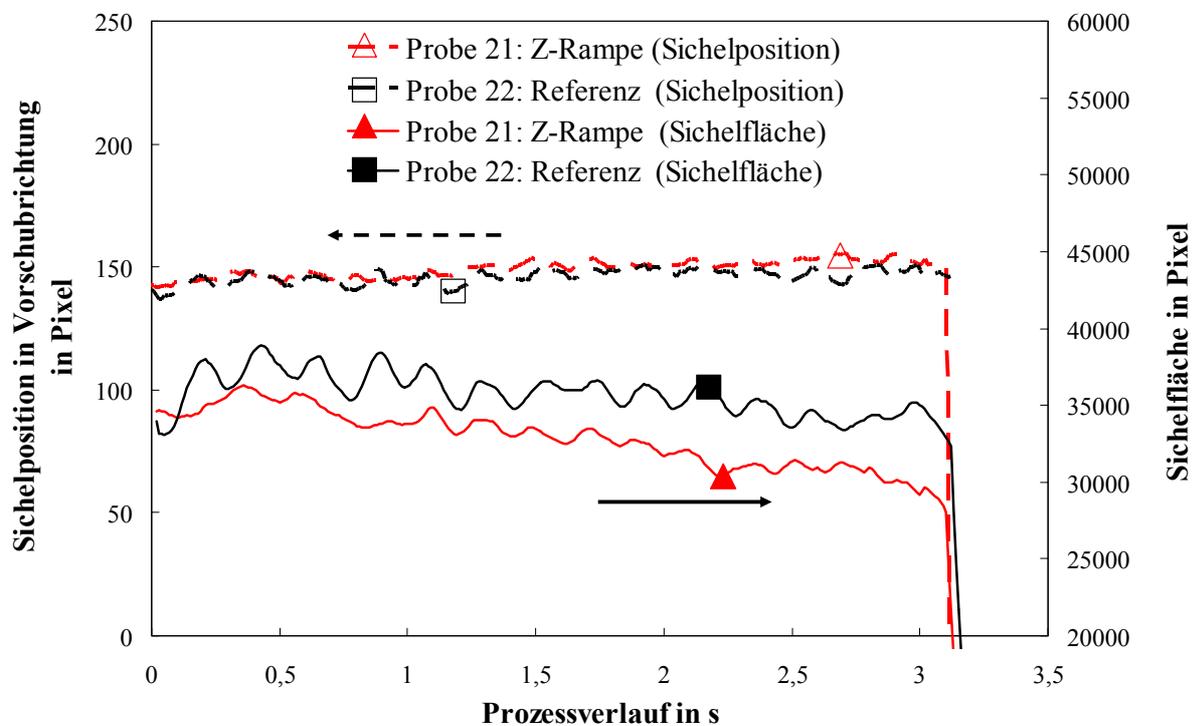
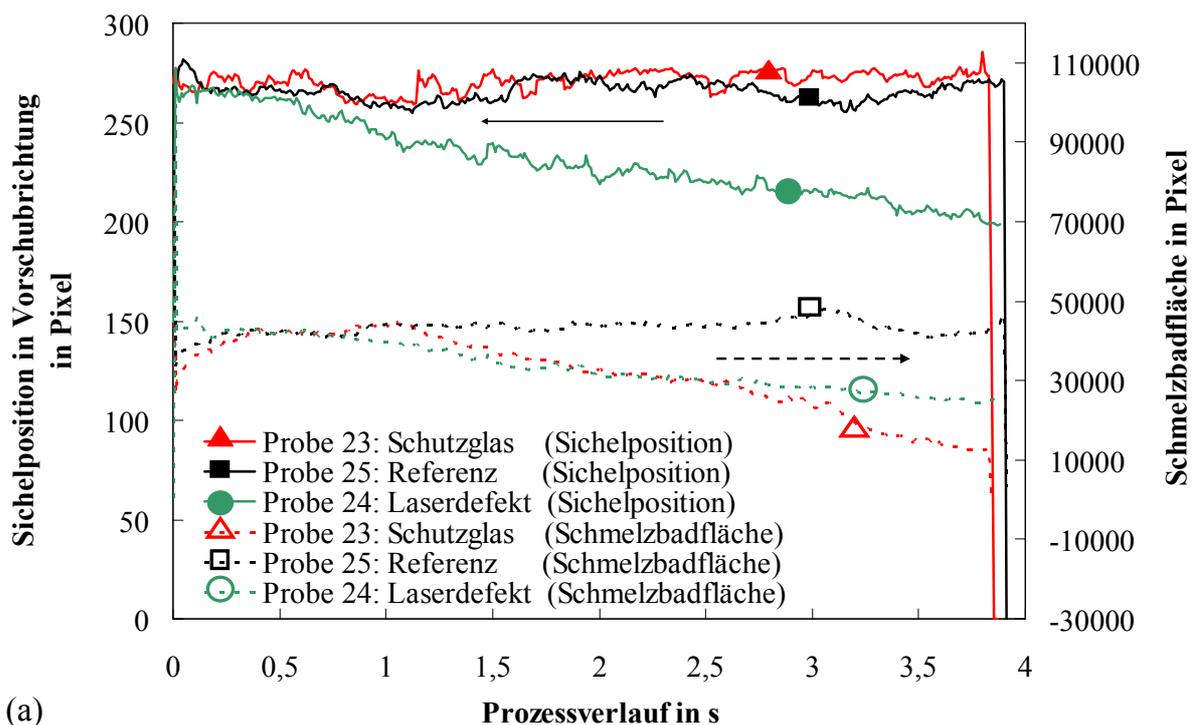


Bild 104: Diagnose von Fehlern im Arbeitsabstand durch die Prozessüberwachungskamera beim Umschmelzen.

- Ursache einer unplanmäßig verringerten Energiedichte kann beim Einsatz eines Diodenlasers eine Schutzglasverschmutzung oder ein Laserdefekt sein. Auch hier muss die Umschmelztiefen- und Umschmelzbreitenanalyse die Änderung der Qualitätsgröße erkennen. Mithilfe weiterer Bildverarbeitungsrouitinen kann die Ursache des Prozessfehlers bestimmt werden. Im Bild 105 wird die Trennung zwischen einer simulierten Schutzglasverschmutzung und einem Laserdefekt in Form eines Leistungsdichteabfalls auf einer Spothälfte dargestellt. Da in beiden Fällen die Gesamtlaserleistung um fünfzig Prozent verringert wird, ist ein gleichmäßiger Abfall beider Schmelzbadflächen nachvollziehbar. Unterschiedlich verhalten sich die Brennfleckschwerpunkte quer zur Vorschubrichtung. Während im Fall der simulierten Schutzglasverschmutzung der Schwerpunkt durch die gleichmäßige Brennfleckverkleinerung konstant bleibt, verlagert sich der Schwerpunkt im Fall eines Laserdefektes zur Seite der intakten Leistungsdichte.



(a)

Sichelposition	Schmelzbadfläche	Anlagenzustand
O	O	Anlage ist in Ordnung
O	↓	Schutzglas ist verschmutzt
↓/↑	↓	Laser ist defekt

(b)

Bild 105 (a) Diagnose der Schutzglasverschmutzung und eines Laserdefektes durch die Prozessüberwachungskamera. (b) Matrix zur Klassifizierung der Fehlerursache.

### 5.2.5 Bewertung des Prozessergebnisses (Prüfstufe 3)

Liegt ein Prozess mit einer qualitätsmindernden Auffälligkeit vor, sind die Umschmelzdimensionen nicht relevant, da die Oberfläche ihren Anforderungen nicht gerecht wird. In manchen solchen Fällen, z.B. durch eine verfälschte Sichelbildung bei Schutzgasmangel, können die Umschmelzdimensionen dann nicht bestimmt werden. Erst mit Vorliegen eines unauffälligen Prozessverlaufes werden

- Umschmelzbreite nach Kapitel 4.1.2 und
- Umschmelztiefe nach Kapitel 4.1.3

bestimmt und die abschließende Prozessbewertung ausgegeben.

Da beim Laserumschmelzen alle Qualitätsmerkmale durch Emissionen während des Prozesses erfasst werden, endet der Messzeitraum mit Prozessende und ein nachgeschaltetes Messsystem ist nicht erforderlich.

## 5.3 Messstrategie zum Laserstrahlbeschichten

Analog zum Laserstrahlumschmelzen ist auch beim Laserstrahlbeschichten eine Mess- und Auswertestrategie nötig, die aufgrund der erhöhten Anlagen- und Prozesskomplexität sowohl in der Anzahl der Messzeitpunkte als auch der nötigen Sensoren umfangreicher gestaltet werden muss. Bild 106 zeigt die Strategie zur Online-Überwachung eines Beschichtungsprozesses unter Beachtung der Qualitätsanforderungen aus Kapitel 3.3.2.

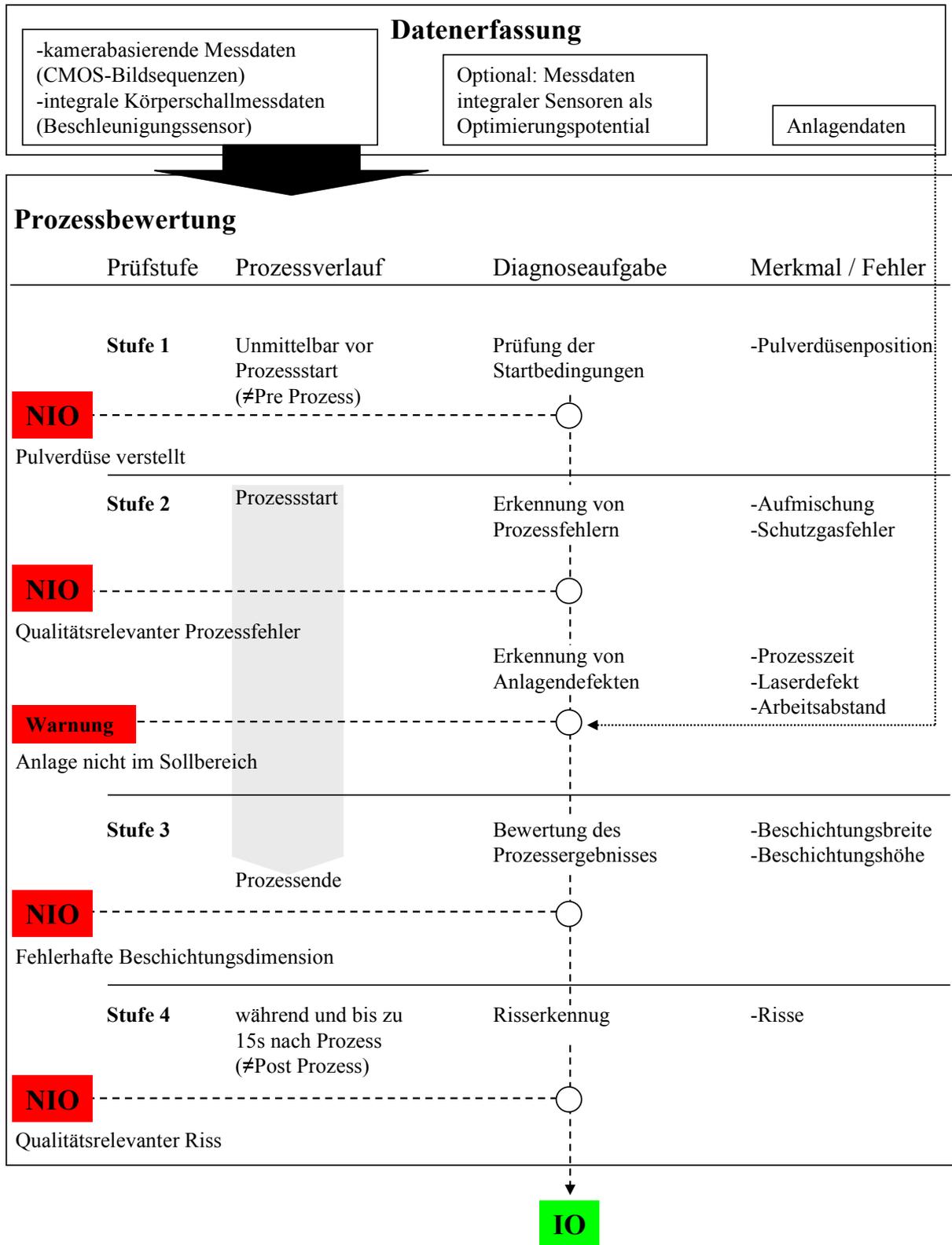


Bild 106: Mess- und Auswertestrategie beim Laserstrahlbeschichten.

### 5.3.1 Datenerfassung

Zur umfassenden Überwachung des Beschichtungsprozesses wird eine Kombination aus CMOS-Kamera und Körperschallsensor empfohlen. Die Bildauswertung der CMOS-Daten konnte in den Untersuchungen aus Kapitel 4.2.2 bis 4.2.7 ein vielseitiges Erkennungsspektrum mit hoher Trennschärfe nachweisen. Lediglich ein Qualitätsmerkmal, das teilweise erst nach dem Prozessende auftritt, wird von der Kamera nur unzureichend erkannt. Risse, die bis zu fünfzehn Sekunden nach Prozessende auftreten, entstehen vorwiegend durch fehlerhafte Aufmischungen. Beschichtungsspuren mit entsprechender Aufmischung werden vom Kamerasystem erkannt und können als Spuren mit erhöhter Rissgefahr benannt werden. Ob tatsächlich ein Riss vorliegt, kann die Körperschallanalyse klären.

Ein Soll-Ist-Abgleich der Anlagendaten zu den Messdaten bietet zusätzliches Potential zur Fehlererkennung und sollte genutzt werden.

### 5.3.2 Prüfung der Startbedingungen (Prüfstufe 1)

Die schon angedeutete komplexere Anlagentechnik beim Laserstrahlbeschichten findet sich beispielsweise in der koaxialen Pulverdüse wieder, die ein hohes Fehlerpotential im falsch justierten oder verstellten Zustand darstellt. Die Düse kann durch mechanischen Kontakt verstellt werden, wodurch Laser- und Pulverauffreffpunkt nicht übereinstimmen. Da die koaxiale Prozessüberwachungskamera Teile des optischen Wegs der Laserstrahlung nutzt, ist der Mittelpunkt der Laserstrahlung auf dem CMOS-Chip stationär. Durch die bildbegrenzende Pulverdüsöffnung kann deren Position relativ zum Strahlzentrum ermittelt und eine verstellte Düse erkannt werden (siehe Kapitel 4.2.5). Diese Kontrolle wird unabhängig von Prozessemissionen durchgeführt. Daher sollte sie aus wirtschaftlicher Sicht vor dem Beschichtungsprozess durchgeführt werden um Bauteilausschuss zu vermeiden.

### 5.3.3 Erkennung von Prozessfehlern (Prüfstufe 2)

Prozessfehler, die während des Prozesses entstehen und erkannt werden, sind in ihrer Auswirkung in Kapitel 3.3.2 und ihre Erkennungsstrategien in Kapitel 4.2 vorgestellt worden. Hierzu zählen:

- Fehlerhafte Aufmischung, die nach Kapitel 4.2.4 erkannt wird und
- Unzureichende Schutzgaszufuhr nach Kapitel 4.2.6 .

Analog zum Laserstrahlumschmelzen gilt es auch beim Beschichten die Grenze zur Qualitätsminderung zu berücksichtigen und entsprechend nur Warnungen zu melden, wenn ein Prozessfehler vorhanden ist, aber die Auswirkung auf die Bauteilqualität noch im Toleranzbereich liegt.

### 5.3.4 Erkennung von Anlagendefekten (Prüfstufe 2)

Eine umfassende Kontrolle von Anlagendefekten stand nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit sondern die Gewährleistung der Bauteilqualität. Dennoch soll ein Beispiel eines typischen Anlagenfehlers und dessen Erkennung vorgestellt werden. Die Auswirkung einer verringerten Pulverenergie auf den Prozessverlauf wurde in Kapitel 4.2 dargestellt, ein Ursachenhinweis wird in Bild 107 gegeben. Ursache der verringerten Pulverenergie kann einerseits in tatsächlich fehlender Laserleistung z.B. durch Schutzglasverschmutzung oder Laserdefekt oder andererseits in einem größeren Strahldurchmesser verursacht durch einen vergrößerten Abstand von Bearbeitungsoptik zu Werkstückoberfläche liegen. Im Fall einer verringerten Laserleistung erfolgt eine starke Verkleinerung der Schmelzbadausbildung in Kombination mit einer Verkleinerung der Wechselwirkungszonenausbildung. Ein erhöhter Arbeitsabstand (Z-Abstand) führt zu einer fluktuierenden Zerstörung des Schmelzbades, erkennbar an der stark ausschlagenden Kurve in Bild 107a ab einer Defokussierung von ca. 2mm. Die Größe der Wechselwirkungszone nimmt aufgrund des erhöhten Strahldurchmessers zu. Bild 107 zeigt am Beispiel eines Laserleistungssprunges und einer Rampe im Arbeitsabstand (Z-Rampe) den ähnlichen Verlauf der erkannten Schmelzbadausbildung und das gegenläufige Verhalten der Ausbreitung der Wechselwirkungszone, wodurch eine Unterscheidung der Ursache möglich ist.

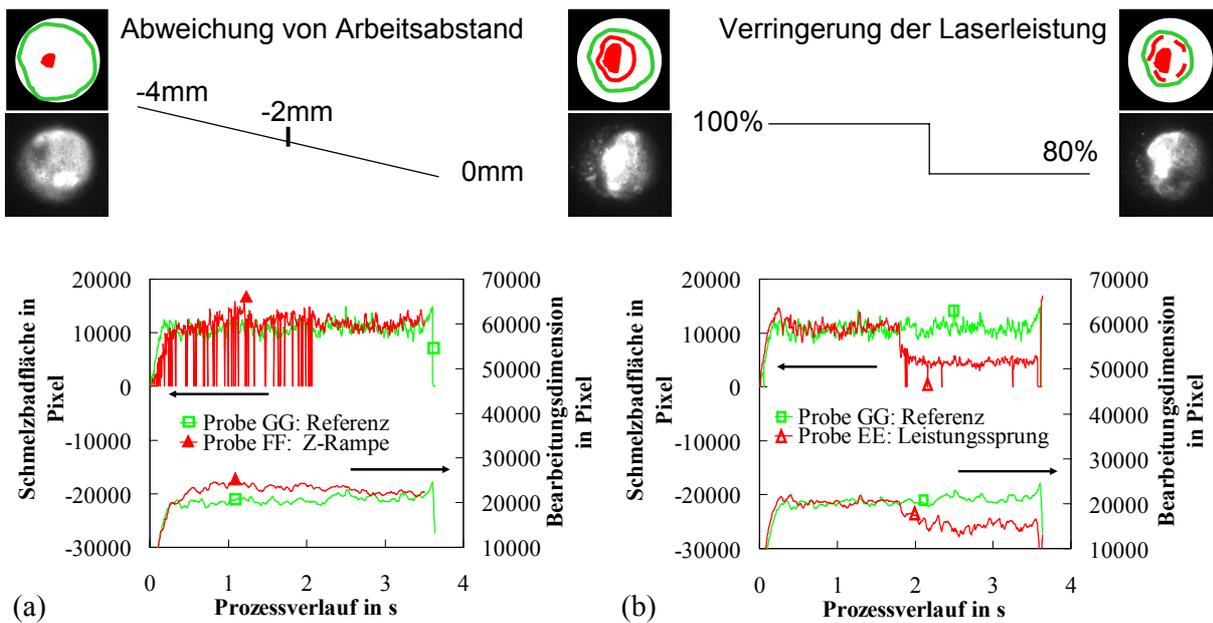


Bild 107: Diagnose von Anlagefehlern durch die Prozessüberwachungskamera. (a) Klassifizierung eines falschen Arbeitsabstandes und (b) einer sprunghaft verringerten Laserleistung.

### 5.3.5 Bewertung des Prozessergebnisses (Prüfstufe 3)

Das Prozessergebnis in Form der Spurbreite und -höhe wird ebenfalls während des Beschichtungsprozesses bewertet. Voraussetzung dafür ist ein unauffälliger Prozess, der auswertbare Schmelzbadbereiche beinhaltet. Aus diesem Grund und weil von einer defekten Spur keine Abmaße bestimmt werden müssen, erfolgt die Prozessergebnisbewertung nach der Prozessfehlererkennung, obwohl der Messzeitpunkt identisch ist. Prozessemissionen in den Bilddaten der CMOS-Kamera werden zur Bestimmung der

- Beschichtungsbreite nach Kapitel 4.2.2 und
- Beschichtungshöhe nach Kapitel 4.2.3 bewertet.

### **5.3.6 Risserkennung während und nach dem Prozess (Prüfstufe 4)**

Eine Besonderheit beim Laserbeschichten ist die Anfälligkeit des Prozesses für Rissbildung, bedingt durch die metallurgische Verbindung von Beschichtungs- und Grundwerkstoff. Die Entstehungsmechanismen von Erstarrungsrissen, die über das Prozessende hinaus auftreten können, macht eine Kontrolle der Rissentstehung während und bis zu fünfzehn Sekunden nach dem Prozess nötig. Es besteht dabei die Möglichkeit durch die klare Trennung von Prozess- und Risssignal weitere Beschichtungen am selben Bauteil durchzuführen, um nur nach der letzten Beschichtung die zusätzliche Messzeit von fünfzehn Sekunden einmalig anzuschließen. Der Körperschallsensor, der nach Kapitel 4.2.7 Risse wahrnimmt, muss Kontakt zum Bauteil haben, d.h. er ist z.B. in die Spannvorrichtung integriert.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Laserstrahlverfahren gewinnen aufgrund ihrer Flexibilität ein immer breiteres Anwendungsgebiet. Die mit Qualitätssicherung verbundenen Kosten und anwachsende Anlagenkomplexität wurden in der Vergangenheit oft nur bei hochwertigen Produkten in Kauf genommen. Der zunehmende Einsatz von Laserstrahlverfahren bei qualitätsrelevanten Bauteilen, die hohe Prozessdynamik und das kleine Prozessfenster zusammen mit dem Bewusstsein, dass Bauteilausschuss die Produktionskosten in die Höhe treibt, bewirken momentan einen Zuwachs an Qualitätssicherungssystemen in Serienanlagen.

Die Kontrolle der Bauteilqualität kann über verschiedene Ansätze umgesetzt werden. Zum einen ist die Überwachung der Anlageparameter und der daraus resultierende Schluss auf die Bearbeitungsqualität eine Möglichkeit. Dabei können einige Prozessparameter oder Bauteilschwankungen verschiedener Chargen nur schwer abgedeckt werden. Dagegen ist eine Prüfung des Prozessergebnisses durch eine nachgeschaltete Prüfstation zuverlässiger. Nachteil solcher Stationen sind die zusätzlichen Investitionskosten, der erhöhte Platzbedarf, die erforderliche Prüfzeit und nicht zuletzt die eingeschränkte Erkennungsvielfalt bei verschiedenen Qualitätsgrößen oberhalb sowie unterhalb der Bauteiloberfläche. Eine Sichtprüfung erkennt keine Qualitätsmerkmale unterhalb der Oberfläche und birgt zusätzlich das Risiko einer nicht konstanten und nicht objektiven Bewertung.

Die durch die Primärstrahlung des Bearbeitungslasers induzierten Sekundäremissionen aus der Wechselwirkungszone beinhalten eine Vielzahl an Informationen zur Prozessüberwachung. In Abhängigkeit vom Schmelzbadzustand werden verschiedene Sekundäremissionen von einem Sensor empfangen. Daraus generierte Signalverläufe machen eine Ergebnisbewertung und Fehlererkennung möglich.

Die Entwicklung eines Prozessüberwachungssystems für das Laserstrahlumschmelzen und -beschichten zur Bewertung der Bearbeitungsdimensionen und zur Erkennung qualitätsrelevanter Fehler auf Basis der entstandenen Prozessemissionen aus der Wechselwirkungszone ist Ziel dieser Arbeit.

Die Auswahl eines geeigneten und vielseitigen Sensors ist ein erster wichtiger Schritt. Zu Beginn, im Kapitel 3, wird eine Auswahl an Sensoren vorgestellt, welche die Untersuchungen begleiten sollten. Am Ende, in Kapitel 5, wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse ein Sensorsystem für das Laserstrahlumschmelzen und – beschichten empfohlen. Nimmt ein Sensor wichtige Informationen aus der Wechselwirkungszone nicht wahr weil er z.B. im falschen Wellenlängenbereich misst oder seine Abtastrate nicht auf die Prozessdynamik abgestimmt ist, kann keine aussagekräftige Prozessbewertung erfolgen. Zu diesem Zweck werden verschiedene integrale und orts aufgelöste Sensoren in die Untersuchungen einbezogen. Vertreter ortsauflösender Sensoren sind drei verschiedene CMOS-Kameras. Unter den integral messenden Sensoren zeigen ein Temperatur- und Rückreflexsensor sowie ein Spektrometer und Beschleunigungssensor ihre Eignung.

Die Untersuchungen aus Kapitel 4 zeigen, dass integral messende Sensoren sehr gut auf relative Änderungen innerhalb des Prozessverlaufes reagieren. Damit sind integrale Sensoren besser geeignet um Anomalien im Prozess wie z.B. Coatingdefekte zu erkennen als absolute Größen wie Bearbeitungsdimensionen zu bewerten. Ortsauflösende Sensoren sind dagegen in der Lage Prozessemissionen nicht nur in der Intensität sondern zusätzlich in der Position zu bestimmen. Kameras bieten einen umfassenden Informationsgehalt, der sich in der Erkennungsvielfalt sowohl bei absolut zu vermessenden Bearbeitungsdimensionen als auch bei der Erkennung von Kurzzeitschwankungen durch Prozessstörungen widerspiegelt.

Um aus den Kamerabildern die entsprechenden Algorithmen zur Erkennung von Qualitätsmerkmalen bei umgeschmolzenen und beschichteten Spuren ableiten zu können, wurden mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera und den Filmdaten der Prozessüberwachungskamera die physikalischen Effekte in der Wechselwirkungszone ermittelt. Die Zusammenfassung der Schmelzbadeffekte in Korrelation zu den Prozessemissionen bilden die vorgestellten Modelle für das jeweilige Verfahren. Dieses Modell der physikalischen Zusammenhänge im Schmelzbad in Verbindung mit den Qualitätsmerkmalen ist die Grundlage und die Funktionsweise der Indikatoren.

Ergebnis eines solchen Indikators ist ein Signalverlauf zugehörig zum entsprechenden Qualitätsmerkmal, dessen Signalniveau und Signaldynamik wiederum vom Prozessüberwachungssystem bewertet wird. Ein solcher Indikator muss reproduzierbar, robust sowie konstant arbeiten und die Bewertung mit möglichst hoher Trennschärfe durchführen. Um die Unempfindlichkeit des Prozessdiagnosesystems gegen äußere Störgrößen zu erhöhen können optische und Softwarefilter eingesetzt werden. Sehr viel Wert wurde in dieser Arbeit auf das prozessparameterunabhängige Erkennen der

Qualitätsgröße gelegt. Das Prozessüberwachungssystem soll in der Lage sein, Veränderungen in einer Qualitätsgröße unabhängig von der verursachenden Prozessgröße zu erkennen. Vorwiegend aus den vielfältigen Informationen der CMOS-Bildern wurden Indikatoren entwickelt und qualifiziert, die beim Laserstrahlumschmelzen und -beschichten wichtige Merkmale der Bearbeitungsqualität überwachen. Die Trennschärfe ist an industrielle Anforderungen aus der Automobilproduktion angelehnt, um eine Übertragbarkeit auf spätere Zielbauteile zu gewährleisten.

Entwickelt und qualifiziert wurden Indikatoren beim Laserstrahlumschmelzen zur Bewertung der Bearbeitungsqualität. Die Breite der umgeschmolzenen Spur kann mittels einer Isotherme in der Wechselwirkungszone bestimmt werden, die in ihrer Breite vermessen wird. Die Umschmelztiefe kann durch die Verschiebung eines sichelförmigen hellen Bereiches der Wechselwirkungszone auf der Vorschubachse bewertet werden. Verschiedene Coatingarten haben Veränderungen in der Emissionsintensität zur Folge und Beschädigungen im Coating führen zu Störungen in den entsprechenden Bereichen der erkannten Wechselwirkungszone. Die chemische Veränderung der Schmelzbadoberfläche durch eine mangelhafte Schutzgasatmosphäre wirkt sich in erhöhter Strahlabsorption aus und kann durch die dazu proportional erhöhte Prozessemission nachgewiesen werden. Gaseinschlüsse im Grundwerkstoff verschieben das Gleichgewicht zwischen Laserenergie und Werkstoffmasse, wodurch die Wechselwirkungszone überdurchschnittlich erhitzt wird. Die je nach Lunker auftreten ungleichmäßig ansteigende Wechselwirkungszonentemperatur kann vom normalen Prozessverlauf deutlich unterschieden werden. Ein gesonderter Auswertebereich im CMOS-Bild mit dem Prinzip eines Füllstandsanzeigers erkennt Abweichungen in der vorgegebenen Bearbeitungsposition anhand von Referenzkonturen.

Beim Laserstrahlbeschichten wird die Breite einer Beschichtungsraupe analog zum Laserstrahlumschmelzen über die Breite einer Isothermen in der Wechselwirkungszone bewertet. Veränderungen in der Höhe der Beschichtungsspur bewirken durch die Draufsichtperspektive der Überwachungskamera eine Verschiebung des Schmelzbades auf der Vorschubachse. Die Aufmischung einer Beschichtungsspur wird näherungsweise über deren Definition bewertet. Die dafür nötige Spurhöhe und Spurtiefe werden unabhängig voneinander bestimmt und mittels empirischer Konstanten verrechnet. Die Spursymmetrie, die im Wesentlichen von der Pulverdüseneinstellung abhängt, wird prophylaktisch vor dem Beschichtungsprozess durch die Abweichung des Laserstrahlmittelpunktes zum Pulverstrahlmittelpunkt überwacht. Eine unzureichende Zufuhr von Schutzgas kann zu Porenbildung führen. Poren selbst können nicht erkannt werden

aber ein Zusammenhang zwischen den Prozessemissionen und der zugeführten Schutzgasmenge sorgt dafür, dass kein Prozesszustand mit verringerter Schutzgasmenge, der zu Porenbildung führen kann, auftritt. Risse, die bis zu einer gewissen Zeit nach Prozessende entstehen können, werden durch eine Überwachung der im Werkstoff auftretenden Körperschallwellen detektiert.

Eine Mess- und Auswertestrategie vereinigt in Kapitel 5 die entwickelten Indikatoren zu einem System, das in der Lage ist den Bearbeitungsprozess und die Bearbeitungsqualität zu überwachen. Beim Laserstrahlumschmelzen beginnt der Messzeitraum mit dem Prozessstart und endet mit Prozessende, da keine relevanten Informationen vor und nach dem Prozess entstehen. Die ersten Emissionen am Prozessbeginn werden genutzt um zu prüfen, ob ein Werkstück mit korrektem Coating vorliegt, bevor im restlichen Prozessverlauf die Qualitätsmerkmale überwacht werden. Der Messzeitpunkt beim Laserstrahlbeschichten beginnt vor dem eigentlichen Prozess mit der vorbeugenden Kontrolle der Pulverdüsenposition durch die Prozessüberwachungskamera. Während der Bearbeitung werden die Informationen für den Hauptteil der Qualitätsmerkmale erfasst und die Prozessüberwachung endet mit der Körperschallmessung, die so lange über das Prozessende hin andauert, wie das Risiko besteht, dass sich Risse beim Abkühlen bilden können. Die Auswertestrategie ist nicht zwingend an die Zeitpunkte gekoppelt, an denen Emissionen entstehen die Rückschlüsse auf die Qualität zulassen, sondern steuert die Reihenfolge, in der die Qualitätsmerkmale analysiert werden. Sowohl beim Laserstrahlumschmelzen als auch -beschichten wird zuerst nach Prozessfehlern gesucht, die die Bauteilqualität vermindern, bevor die Bearbeitungsdimensionen bewertet werden. Aus Sicht der Produktion ist bei einem fehlerhaften Bauteil die Bearbeitungsdimension nicht mehr von Interesse, weil das Bauteil ohnehin ausgeschleust werden muss. Aus Prozessdiagnosesicht ist eine Bewertung der Bearbeitungsdimension dann nicht mehr möglich, wenn ein Prozessfehler die Emissionen der Wechselwirkungszonen dahingehend stört, dass die verschiedenen Bereiche der Wechselwirkungszone nicht mehr eindeutig erkannt und ausgewertet werden können.

Ein Sensorsystem, bestehend aus einer CMOS-Kamera, einem Beschleunigungssensor und einer Echtzeitauswerteeinheit mit Ergänzungspotential durch einen Infrarot- und Rückreflexsensor, in Kombination mit einer Mess- und Auswertestrategie, wird vorgestellt. Dieses Prozessdiagnosesystem konnte im Rahmen der Systemtechnik und der Werkstoffe dieser Arbeit die Eignung zur Überwachung verschiedener Qualitätsmerkmale beim Laserstrahlumschmelzen und -beschichten nachweisen. Eine Aussage zur allgemeinen Eignung des Online-Prozessüberwachungssystems für das Laser-

strahlumschmelzen und -beschichten kann dabei nicht gemacht werden. Da die Sekundäremissionen zur Prozessbewertung eine Folge der Eigenschaften der Wechselwirkungszone sind und diese unmittelbar von den Bearbeitungsbedingungen wie Prozessparameter, Werkstoffe und Systemtechnik abhängen, muss die Messgenauigkeit und Trennschärfe bei jeder Anwendung individuell untersucht werden. Eine allgemeingültige Aussage über die Messgenauigkeit ist dann möglich, wenn ein System sowohl Sender und Empfänger stellt und damit unabhängig vom individuellen Bearbeitungsprozess ist.

Die Mess- und Auswertestrategie in Verbindung mit den vorgestellten Indikatoren stellt, implementiert auf einem Echtzeitsystem, ein prototypisches Prozessüberwachungssystem dar. Die zur Entwicklung und Qualifizierung durchgeführten Untersuchungen wurden unter Laborbedingungen auf Aluminiumproben mit flacher Oberfläche durchgeführt, wobei eine Übertragbarkeit verschiedener Indikatoren auf andere Oberflächekonturen außerhalb dieser Arbeit erfolgreich getestet wurde. Der Nutzen eines solchen Prozessüberwachungssystems für den Anwender liegt in einer objektiven, konstanten Prüfung von Bauteilen mit hohen Stückzahlen. Damit sind Kosteneinsparungen beim Ersatz einer Sichtkontrolle und eine kontrollierte Produktqualität möglich. Der Einsatz von bildgebenden Überwachungssystemen bietet den Vorteil parallel zum Entwickeln eines Prozessüberwachungssystems zusätzlich noch Prozessverständnis aufzubauen. Der Prozess wird in seinem Verlauf durch Filmdaten und Messsignale visualisiert, was sowohl bei der Prozessoptimierung als auch bei der Fehlersuche von abweichenden Prozessverläufen hilfreich ist. Beim Anwenden bietet ein bildgebendes System den Vorteil, zusätzlich zu den geforderten Qualitätsmerkmalen, den Anlagenzustand in einigen relevanten Bereichen zu überwachen.

Die vorgestellten Ergebnisse sind in zahlreichen Versuchsreihen bestätigt worden und zeigen das Potential auf, die Prozessemissionen aus der Wechselwirkungszone nutzen zu können, um das Bearbeitungsergebnis zu bewerten und Bearbeitungsfehler erkennen zu können. Darauf aufbauend ist es möglich, eine Übertragung auf Realbauteile vorzunehmen und das prototypische Echtzeitsystem zu einem Seriengerät zu führen. Dazu müssen Qualitätsmanagementnormen wie die ISO 9000 berücksichtigt werden, sowie Schnittstellen zum Endanwender und Datenarchivierungs- und Dokumentationssysteme eingebunden werden. Den Forschern und Entwicklern bleibt der technische Fortschritt der Sensoren, um die Zuverlässigkeit und Trennschärfe von Diagnosesystemen weiter zu optimieren. Ein Ansatz für die nahe Zukunft ist der Einsatz von Multi-Region-of-Interest-Kameras. Solche Kameras ermöglichen es, verschiedene Bildbereiche im CMOS-Chip mit unterschiedlichen Belichtungszeiten zu

analysieren. Damit kann die Belichtungszeit auf das zu erkennende Qualitätsmerkmal angepasst werden und die Belichtungszeit besteht nicht aus einem Kompromiss, bei dem alle Qualitätsmerkmale mit einer Bildhelligkeit erkannt werden müssen. Auch der Einsatz von Zusatzbeleuchtung birgt großes Potential zur Verbesserung bestehender Indikatoren und Entwicklung neuer Algorithmen.

Der Einsatz von schnellen und hochdynamischen Kameras zur Prozessüberwachung bietet eine noch nicht ausgeschöpfte Vielfalt an Informationen aus dem Prozess mit einem hohen Potential zur Weiterentwicklung bis hin zur Prozessregelung.

## 7 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] BEYER, E.; WISSENBACH, K.: *Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung*, Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [2] HEIGL, R.: *Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2004.
- [3] KEHLER, H.; HADDENHORST, H.: *Wärmebehandlung laserdispergierter Aluminiumrandschichten*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Bd. 26, Heft 6, (1995) S.289.
- [4] VDI: *VDI-Wärmeatlas: Berechnen-Recherchieren-Konstruieren*. Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.), 10.Auflage, Berlin: Springer, 2006.
- [5] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Stuttgart: Teubner, 1992.
- [6] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Stuttgart: Teubner, 1995. zugl.: Stuttgart, Universität, Habilitationsschrift, 1995.
- [7] LANDOLT-BRÖNSTEIN: *Daten- und Funktionssammlung in Wissenschaft und Technik*. Berlin: Springer, 1990.
- [8] OHMLE, T.: *Untersuchungen zur Qualitätssicherung bei Laserbeschichtungs- und Umschmelzvorgängen*. BTU-Cottbus, Diplomarbeit, Cottbus, 2003.
- [9] STERN, D.: *Absorptivity of CW CO<sub>2</sub>, CO and Nd:YAG-Laser Beams by Different Metallic Alloys*. In: Bergmann, H.W.; Kupfer, R. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Erlangen, 1990. S. 25-35.

- [10] SHEN, J.: *Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung bei gleichzeitiger Pulverzufuhr*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1994.
- [11] RÖMER, G.R.B.E.: *Modelling and control of laser surface treatment*. G.R.B.E. Römer, Eibergen, the Netherlands, 1999.
- [12] PIRCH, N.; KREUTZ, E.W.: *Modelling of Surface Deformations for Remelting with Laser Radiation*. In: Proc. 5<sup>th</sup> Eng. Foundation Conf., Davos, 1990.
- [13] ZWICK, A.; WISSENBACH, K.; HOLTEN, W.; PODHORSKY, M.; KREUTZ, E.W.: *Laser Processing of Assembled Camshafts*. In: Proceedings ISATA'92, 1992, S.319-326.
- [14] HAFERKAMP, H.; BURMESTER, I.; CZERNER, S.: *X-Ray visualisation of the transportation processes of hard particles in the melt pool of steel alloys and TiAl6V4 during laser dispersing of hard particles*. In: European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT'98), Frankfurt am Main, 1998, S.111-116.
- [15] XIE, J.; KAR, A.: *Mathematical modeling of melting during laser materials processing*. Journal of Applied Physics, Vol.81, 7 (1997), S.3015.
- [16] BOYLE, N.; KENNEDY, A.; CONNOLLY, J.: *Laser cladding development for the gas turbine industrie*. In: The Irish Scientist Nr.7, 11, online verfügbar unter <http://www.irishscientist.ie/p91.htm>, 1999.
- [17] OLLIER, B.; PIRCH, N.; KREUTZ, E.W.: *Ein numerisches Modell zum einstufigen Laserstrahlbeschichten*. In: Laser und Optoelektronik 27 (1995), S.63-70.
- [18] HOADLEY, A.F.A.; RAPPAZ, M.: *A Thermal Model of Laser Cladding by Powder Injection*. In: Metallurgical Transactions Vol.23B, 1992, S.631-642.
- [19] SATO, A.; KAWASAKI, M.; NUNOKAWA, S.; MASUDA, Y.; YAMAMOTO, Y.: *Development of Mass Production Technology for Laser-Clad Valve Seat*. In: Roessler, D.M. (Hrsg.): New Materials & Development Processes, Proc. of the 2000 global powertrain congress, Vol.16, Detroit, 2000, S.92-101.

- [20] GRÜNENWALD, B.; SHEN, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Laser cladding with composite powders using pyrometric temperature control and beam combining*. In: Proc. of the 26<sup>th</sup> International Symposium on Automotiv Technology and Automation (ISATA), Aachen, 1993. Croydon: Automotiv Automation Limited, 1993, S.287.
- [21] VOGEL, S.; WEISHEIT, A.; MORDIKE, B.L.: *Untersuchungen zum Laserstrahlbeschichten des Legierungssystems Cu-Fe-Al-C*. In: Sepold, G. (Hrsg.); Geiger, M. (Hrsg.): *Strahl-Stoff-Wechselwirkungen bei der Laserbearbeitung. Beiträge zum Abschlusskolloquium der Deutschen Forschungsgemeinschaft*. Bremen, 1998, S.223-228.
- [22] VOLZ, R.: *Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1998.
- [23] GRÜNENWALD, B.; HEIGL, R.; SIGEL, J.; DAUSINGER, F.: *Laserbeschichten mit CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Lasern*. In: Dausinger, F. et. al. (Hrsg.): *6th Eur. Conf. on Laser Treatment of Materials ECLAT'96*. Wiesbaden: AWT, 1996, S.299-306.
- [24] BACKES, G.; KREUTZ, E.W.; GASSER, A.; STROMEYER, R.; WISSENBACH, K.: *Process monitoring and control during alloying and cladding with CO<sub>2</sub> laser radiation*. In: Mordike, B.L. (Hrsg.): *Papers pres. at the Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials (ECLAT'98)*, Hannover, 1998, S.227-236.
- [25] LANG, A.; BERGMANN, H.W.: *Herstellung diamanthaltiger, endkonturnaher Metallmatrix-Verbundwerkstoffe durch Laserstrahlbeschichten*. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, Vol.27, 1996, S.215-226.
- [26] LANG, A.; WALDMANN, H.; BERGMANN, H.W.: *Cladding of metallic substrates with diamonds and cubic boron nitride*. In: *5th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT'94)*, Bremen. DVS-Berichte, Bd.163, 1994, S.456-461.
- [27] REICHELT, U.; BECK, U.; VOLZ, R.: *Vielfältiger Einsatz des Festkörperlasers in der Oberflächenveredelung*. In: *Laser und Optoelektronik* 26 (1994), S. 40-44.

- [28] WEERASINGHE, V.M.; STEEN, W.M.: *Computer simulation model for laser cladding*. In: Chen, M.M. (Hrsg.); Mazumder J. (Hrsg.): Symposium on Transport Phenomena in Materials Processing. Heat Transfer Division, American Society of Mechanical Engineering (ASME), New-York, 1983, S.15-23.
- [29] GASSER, A.: *Oberflächenbehandlung metallischer Werkstoffe mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung in der flüssigen Phase*. RWTH Aachen, Dissertation, 1993.
- [30] VETTER, P.-A.; ENGEL, T.; FONTAINE, J.: *Laser cladding: the relevant parameters for process control*. In: Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications, Proceedings of the SPIE, Vol.2207 (1994), S.452-462.
- [31] KAPLAN, F.; WEINBERGER, B.; SCHUÖCKER, D.: *Theoretical analysis of laser cladding and alloying*. In: Beckmann, L. (Hrsg.): Proc. EUROPTO (EOS, SPIE), München, 1997, S.499.
- [32] LIN, J.; STEEN, W.M.: *An in-process method for the inverse estimation of powder catchment efficiency during laser cladding*. In: Optics & Laser Technology 30 (1998), S.77-84.
- [33] GRÜNENWALD, B.: *Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996.
- [34] GASSMANN, R.: *Technologische Untersuchungen zum Laser-Auftragschweißen verschleißbeanspruchter Bauteile*. Hochschule für Verkehrswesen, TU-Dresden, Dissertation, Dresden, 1989.
- [35] OLLIER, B.; PIRCH, N.; KREUTZ, E.W.; SCHLÜTER, H.; GASSER, A.; WISSENBACH, K.: *Cladding With Laser Radiation: Properties and Analysis, Laser Treatment of Materials*. In: Proc. ECLAT'92, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel: DGM Informationsgesellschaft-Verlag, 1992, S.687-692.
- [36] BRANDES, E.A.: *Smithells Metal Reference Book*. 6.edition, London: Butterworths, 1983.

- [37] MERIAUDEAU, F.; TRUCHETET, F.: *Control and optimization of the laser cladding process using matrix cameras and image processing*. In: Journal of Laser Applications, 8 (1996) S.317-324.
- [38] CIELO, P.; VAUDREUIL, G.; ARSENAULT, B.; CELINAS, C.; JAMROZ, W.: *Infrared Temperature Sensors for Control of the Surface Melting Process on Superconducting Ceramics*. In: Proceedings of International Conference on Laser Advanced Materials Processing (LAMP'92), Nagaoka, 1992, S.421-426.
- [39] LI, L.; STEEN, W.M.; HIBBERD, R.D.; BROOKFIELD, D.J.: *In-process clad quality monitoring using optical method*. In: Laser-assisted processing II, SPIE proceedings Vol.1279 (1990), S.89-100.
- [40] RESCH, M.; SMID, I.; Schuöcker, D.: *Process control and further improvements for the blown powder process*. In: Proceedings of International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Jacksonville, USA, 2001, S.722-9.
- [41] SMUROV, I.; IGNATIEV, M.: *Real time pyrometry in laser surface treatment*. In: Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996, S.529-564.
- [42] KLEIN, R.; POPRAWE, R.; ZIMMERMANN, K.: *Aspekte zur fertigungstechnisch relevanten Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen mit einem Plasmaüberwachungssystem*. In: DVS-Berichte, Bd. 155, Düsseldorf: DVS-Verlag, 1993, S.152-155.
- [43] SUN, A.; KANNATEY-ASIBU, E.; GARTNER, M.: *Sensor systems for real-time monitoring of laser weld quality*. In: Journal of Laser Applications, Vol.11 (1999) 4, S.153-168.
- [44] TRBOLA, J.: *Inline und PostProcess Prüfung von Laserfügeverbindungen*. In: Kaielerle, S. (Hrsg.): Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.

- [45] STÜRMER, M.: *4D WeldWatcher – Wartungsfreie Prozessüberwachung beim Nd:YAG-Laserschweißen*. In: Kaieler, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.
- [46] MÜLLER, M.G.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2002.
- [47] THEINER, W.A.; KERN, R.; LEJEUNE, I.; MEYER, R.: *Grundlegende Untersuchungen zur orts- und zeitaufgelösten zerstörungsfreien Bestimmung mikrostruktureller Eigenschaften*. In: *Qualifizierung von Laserverfahren*, DVS-Bericht 205, Düsseldorf: DVS-Verlag, 1999, S.81.
- [48] ABELS, P.: *Prozessüberwachung für die Materialbearbeitung mit Laserstrahlung*. In: Kaieler, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.
- [49] BEERSIEK, J.: *Koaxiale Prozessüberwachung an Beispielen aus dem industriellen Einsatz*. In: Kaieler, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.
- [50] MÜLLER-BORHANIAN, J.: *Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2005.
- [51] KOGEL-HOLLACHER, M.; NICOLAY, T.; KATTWINKEL, A.: *Kamerabasierte Prozessüberwachung beim Nd:YAG und CO<sub>2</sub>-Laserschweißprozess*. In: Kaieler, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.
- [52] WILDMANN, D.: *Konzepte und Praxisbeispiele der integrierten Qualitätsüberwachung von lasergefügten Rohkarossen und Bauteilen in der Automobilindustrie*. In: Kaieler, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.

- [53] MANN, S.: *Qualitätskontrolle in der Großserienfertigung von Automobilkomponenten*. In: Kaierle, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.
- [54] HEINEMANN, S.: *Qualitätskontrolle in der Großserienfertigung von Automobilkomponenten mit Laser*. In: *Aachener Kolloquium für Lasertechnik'04 (AKL'04)*, 2004.
- [55] MANDEL, B.M.; SCHWIDER, P.M.: *On-line control and quality improvement of laser-beam welding by high-dynamic CMOS cameras – a major step in manufacturing quality*. In: Geiger, M. (Hrsg.); Otto, A. (Hrsg.): *4<sup>th</sup> Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE 2004*, Erlangen, 2004, S.193-200.
- [56] DEROUET, H.; CAILLIBOTTE, G.; KECHEMAIR, D.: *Towards real time control of surface treatments with liquid phase: Molten depth on-line estimation*. In: *Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications, Proceedings of the SPIE, Vol.2207 (1994)*, S.321-329.
- [57] DEROUET, H.; SABATIER, L.; COSTE, F.; FABBRO, R.: *Process control applied to laser surface remelting*. In: *Laser materials Processing conf. ICALEO'97. Pt.1, San Diego, US, 1997*, S.85-92.
- [58] KLOCKE, F.; KÖNIG, W.; AUER, O.; SCHELLER, D.: *Kombination von Sensorsystemen zur Überwachung umschmelzender Verfahren der Laserstrahlbearbeitung*. In: Sepold, G. (Hrsg.); Geiger, M. (Hrsg.): *Abschlusskolloquium der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Strahl-Stoff-Wechselwirkungen bei der Laserbearbeitung 2. Strahltechnik Bd.6*, Bremen: BIAS, 1998, S.111-116.
- [59] CHOI, J.; HUA, Y.: *Adaptive laser aided DMD (direct metal deposition) process control*. In: *Proceedings of International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Jacksonville, USA, 2001*, S.730-9.
- [60] DEVERMANN, T.: *PD2000*. In: *Produktbeschreibung der Fa. Prometec (CD-ROM): Überwachung von Maschinen, Prozessen, Werkzeugen und Lasern. Ergänzungsteil zum Beschichten*, 2004.

- [61] STEIN, N.: *100% Nahtinspektion mit VIRO<sup>WSI</sup>*. In: Produktbeschreibung der Fa. Vitronik. PDF online verfügbar unter [http://www.vitronik.de/uploads/media/ti\\_nahtpruefung\\_d.pdf](http://www.vitronik.de/uploads/media/ti_nahtpruefung_d.pdf).
- [62] SCHULZ, O.: *Vollautomatische Qualitätssicherung im Automobilbau am Beispiel lasergeschweißter Differentiale*. In: Kaierle, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik - Sicheres und effizientes Laserstrahlschweißen*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2006.
- [63] KOCH, M.: *Qualitätskontrolle bei lasergeschweißten Tailored Blanks*. In: Kaierle, S. (Hrsg.): *Online-Qualitätssicherung in der Laserfügetechnik und effizientes Laserstrahlschweißen durch Nahtfolge und Nahtinspektion*, Aachener Laser Seminare, München: Hanser, 2005.
- [64] BLOEHS, W.; MARX, U.; WAHL, R.; WESSELMANN, L.: *Oberflächenbearbeitung metallischer Bauteile mit dem Festkörperlaser. Einsatzbereiche, Chancen und Potentiale*. Berlin: Inpro GmbH, 2000.
- [65] ZWICK, A.; GASSER, A.; KREUTZ, E.W.; WISSENBACH, K.: *Surface remelting of cast iron camshafts by CO<sub>2</sub>-laser radiation*. In: Proc. of the 3<sup>th</sup> European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT '90), 1990, S.389-398.
- [66] HAMAZAKI, M.: *Laser surface hardening of automotive cams*. *Welding International*, Vol. 9 (1995) 2, S.158.
- [67] WIDDER, T.: *Oberflächenmodifikationen und Werkstoffsubstitutionen zur Verbesserung des thermischen Beanspruchungsverhaltens von speziellen Aluminiumlegierungen am Beispiel von Zylinderköpfen für Wirbelkammerdieselmotoren*. Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1996.
- [68] MACINTYRE, R.M.: *Laser Hardfacing of Turbine Blade Shroud Interlocks*. In: Metzbower, E.A.; Copley, S.M. (Hrsg.): *Laser in Materials Processing: Conference Proceedings*. American Society for Metals, Los Angeles, 1983, S. 230-239.

- [69] BLAKE, A.G.; MANGALY, A.A.; EVERETT, M.A.; HAMMEKE, A.H.: *Laser Coating Technology; a Commercial Reality*. In: Sepold, G. (Hrsg.): Laser Beam Surface Treating and Coating, Proceedings of the Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE Vol.957), 1988, S.56-65.
- [70] THIEMANN, K.G.; EBEN, H.; MARQUERING, M.; VINKE, T.; HAFERKAMP, H.: *Reparaturbeschichten von Turbinenschaufeln*. Laserpraxis (1990) 10, S.101-106.
- [71] HAFERKAMP, H.; BACH, F.W.; GERKEN, J.; EBSEN, H.: *Laserauftragschweißen an Bauteilen für den industriellen Einsatz*. Schweißen & Schneiden 45 (1993) 9, S.513-515.
- [72] BRUCK, G.J.: *Fundamentals and Industrial Applications of High Power Laser Beam Cladding*. In: Sepold, G. (Hrsg.): Laser Beam Surface Treating and Coating, Proceedings of the Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE Vol.957), 1988, S.14-28.
- [73] SEMJONOW, S.A.: *Laser-Pulver-Auftragschweißen an Schneidwerkzeugen*. Schweißtechnik 38 (1988) 4, S.157-160.
- [74] KRON, H. *Erhöhen der Standzeit von Warm- und Kaltformgebungswerkzeugen durch Laserstrahlbehandlung*. In: Minister für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie (Hrsg.): Symposium Lasertechnik in Nordrhein-Westfalen, S. 24.1-13.
- [75] ADACHI, S.; HORIO, K.; NAKAMURA, Y.; NAKANO, K.; TANKE, A.: *Development of Toyota IZZ-FE Engine*. In: SAE Technical Paper, 981087, Warrendale, Pa.: SAE, 1998.
- [76] MIKANE, K.: *Applications of Laser Material Processing in Toyota Motor Corporation*. In: Proc. of the International Conference on Laser Advanced Materials Processing (LAMP'92), Nagaoka, 1992, S.947-952.
- [77] WITTMANN, M.; MIELSCH, G.; STOTHARD, N.: *Beschichtungsverfahren*. EP 1304396 B1, 2003.

- [78] MAIRONE, P.; D'ANGELO, G.; STANISOR, D.: *Laser cladding of aluminium alloys for advanced combustion engines*. In: Proc. of Global Powertrain Congress GPC'98, Detroit, Michigan, USA, 1998, S.113.
- [79] MATSUYAMA, H.; KANO, M.; SHIBATA, K.; NINOMIYA, R.: *Process and material development for laser cladding valve seats on aluminium engine heads*. In: New materials & development processes. Proc. of the 1999 Global Powertrain Congress GPC'99, Vol.11, Stuttgart, 1999, S.56.
- [80] HERZIGER, G.; LOOSEN, P.: *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung*. München: Hanser, 1993.
- [81] MIELSCH, G.; SCHMIDT, M.; STOTHARD, N.: *Laserbeschichten von Zylinderlaufbahnen*. In: Standortbestimmung der Lasertechnologie in der industriellen Materialbearbeitung: SLT'03, Stuttgarter Lasertage '03, 2003.
- [82] HOLST, G.: *A glimpse into the future*. In: Laser + Photonics 2005, Optical Metrology, 2005, S.20-24.
- [83] HEMA: *hil (hema image processing library): Bibliotheksfunktionen für industrielle Bildverarbeitungsaufgaben*. In: Installations-CD zu seelectorCVS Imaging, seelector solutions, Aalen, 2003.
- [84] SCHELLER, D.: *Prozessüberwachung bei der Laseroberflächenbehandlung durch Reflexions- und Temperaturmessung*. RWTH Aachen, Dissertation, 1995.
- [85] FISCHER, T.; DORN H.J.: *Physikalische Formeln und Daten*. Stuttgart: Klett, 1982.
- [86] BECKER, F.M.; BOORTZ, G.; DIETRICH, V.; ENGELMANN, L.; ERNST, C.: *Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II*. Berlin: Paetec, 1996.
- [87] *Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry. Abrasives to Aluminium Oxide*. Volume A1. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.
- [88] *Periodensystem der Elemente*. Online verfügbar unter: <http://www.periodensystem.info/elemente/aluminium.htm>.

- [89] *Periodensystem der Elemente*. Online verfügbar unter: <http://www.periodensystem.info/elemente/argon.htm>
- [90] AUFDERHAAR, C.: *Bestimmung, Korrelation und Vorhersage der Viskosität und Wärmeleitfähigkeit von organischen Fluiden*. Universität Oldenburg, Dissertation, 2000.
- [91] <http://de.wikipedia.org/wiki/Eloxieren>
- [92] ELLIS, M.; XIAO, D.C.; LEE, C.; STEEN, W.M.; WATKINS, K.G.; BROWN, W.P.: *Processing aspects of laser cladding an aluminium alloy onto steel*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 52 (1995), S.55-67.
- [93] DEKUMBIS, R.: *Controlling Residual Stresses in Laser Cladded Coatings*. In: *Lasers in Manufacturing: Proceeding of the 6<sup>th</sup> international conference*, Birmingham, UK, 1989, S.185-192.
- [94] KAWASAKI, M.; TAKASE, K.; KATO, S.; NAKAGAWA M.; MORI, K.: *Development of engine valve seats directly onto aluminium cylinder head by laser cladding process*. In: *SAE Technical Paper*, 920571, Warrendale, Pa.: SAE, 1992.
- [95] HERRMANN, K.; WALTHER, L.: *Wissensspeicher Infrarottechnik*. Fachbuchverlag Leipzig, 1990.
- [96] BÖCKH, P.: *Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis*. Berlin: Springer, 2004.