





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und  
Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Automatisierte Bahnplanung  
für Industrieroboter und Scanneroptiken  
bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung**

**Jens Steffen Hatwig**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen  
Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Darius Burschka

Die Dissertation wurde am 14.11.2013 bei der Technischen Universität  
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am  
18.03.2014 angenommen.



Jens Hatwig

**Automatisierte Bahnplanung  
für Industrieroboter und Scanneroptiken  
bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 289

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2014

ISBN 978-3-8316-4405-6

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

In Erinnerung an

**Dorothee Margarete Hatwig**

geb. Lämmer (1982 – 2011)





## Geleitwort des Herausgebers

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael F. Zäh*



## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Darius Burschka, dem Leiter der Machine Vision and Perception Group des Department of Computer Science (I6) der Technischen Universität München, bedanke ich mich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich recht herzlich bei allen wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, vor allem dem Forschungsfeld Robotik. Zudem hebe ich hiermit meinen Dank an alle Service Center hervor. Großer Dank gilt auch noch allen Studierenden, die mich unterstützten und der Maschine München für das angenehme Arbeitsklima auch nach Feierabend: „Hüpf Maschine! Hüpf!“

Besonders hervorheben möchte ich noch

- Jan Musiol für die stets angenehme Zusammenarbeit in unserem gemeinsamen Forschungsprojekt RoboLaSS und die tollen Ideen zur Gestaltung der Abbildungen,
- Andrea Acker, Georg Völlner und Paul Gebhard für die Jogging Runden, die mich in Form gehalten haben,
- Sherif Zaidan für seine Unterstützung bei den Robotern sowie
- Tanja Mayer, da sie immer ein freundliches Lächeln auf den Lippen hat und da das Zusammenarbeiten mit ihr immer sehr viel Spaß macht.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meinem Bürokollegen Tobias Maier, der mir in allen Lebenslagen mit Rat und Tat zur Seite stand und mich durch seine Kaffee-Koch-Künste zum Genuss dieses Getränks (ver)föhrte.

München, im Frühling 2014

*Jens Hatwig*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Laserstrahlfertigungsverfahren am Standort Deutschland	2
1.2 Überblick über Industrieroboter . . . . .	3
1.3 Motivation . . . . .	4
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Laserstrahlprozesse . . . . .	7
2.1.1 Einordnung von Laserstrahlprozessen anhand von Laserstrahlpositionierkonzepten . . . . .	8
2.1.2 Das Laserstrahlschweißen . . . . .	11
2.1.2.1 Laserstrahlschweißen mit kurzen Brenn- weiten . . . . .	14
2.1.2.2 Remote-Laserstrahlschweißen . . . . .	14
2.1.2.3 Remote-Laserstrahl-Wobbelschweißen . .	16
2.1.3 Das Laserstrahlschneiden . . . . .	18
2.1.3.1 Laserstrahlschneiden mit kurzen Brenn- weiten . . . . .	18
2.1.3.2 Remote-Laserstrahl-Schmelzdruck- schneiden . . . . .	19
2.1.3.3 Remote-Laserstrahl-Abtragsschneiden . .	20
2.2 Laserstrahlquelle und -führung . . . . .	22
2.3 Vergleich der Laserstrahlprozesse . . . . .	26
2.4 Flexible Fertigungszellen mit mehreren Prozessen . . . .	28
2.5 Lasersicherheit . . . . .	30
2.6 Systeme zur Laserstrahlfokussierung . . . . .	31

2.7	Industrieroboter . . . . .	35
2.7.1	Begriffe und Grundlagen . . . . .	35
2.7.2	Kinematisch redundante Systeme . . . . .	38
2.7.3	Programmierarten . . . . .	40
2.7.3.1	Aufgabenorientiertes Programmieren . . . . .	42
2.7.3.2	Automatisierte Programmierung . . . . .	44
2.8	Reihenfolgeoptimierung von Schweißnähten und Schnittkanten . . . . .	45
2.9	Bahnplanungsmethoden bei der robotergeführten Laser- strahlbearbeitung . . . . .	46
2.9.1	Sensorgeführte Laserstrahlbearbeitung . . . . .	47
2.9.2	Laserstrahlbearbeitung mit kurzen Brennweiten . . . . .	48
2.9.3	Remote-Laserstrahlbearbeitung . . . . .	48
2.9.3.1	Scannerlose Bearbeitung . . . . .	49
2.9.3.2	Point&Shoot Bearbeitung . . . . .	50
2.9.3.3	Fliegende Bearbeitung mit Scanneroptiken . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Ausgangssituation und Zielbeschreibung</b>	<b>51</b>
3.1	Ausgangssituation . . . . .	51
3.2	Handlungsbedarf . . . . .	53
3.3	Zielbeschreibung . . . . .	53
3.4	Vorgehensweise . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Programmiersystem für die robotergeführte Remote- Laserstrahlbearbeitung</b>	<b>57</b>
4.1	Phase 1: Erstellen der Aufgabendefinition . . . . .	59
4.1.1	Beschreibung des Umweltmodells . . . . .	59
4.1.1.1	Die Fertigungszelle . . . . .	60
4.1.1.2	Die Spannvorrichtung . . . . .	61
4.1.1.3	Die Handhabungskinematik . . . . .	62
4.1.1.4	Die Scanneroptik . . . . .	64
4.1.2	Beschreibung des Aufgabenmodells . . . . .	65
4.1.2.1	Geometrie-Informationen . . . . .	66
4.1.2.2	Prozess-Informationen . . . . .	68
4.2	Phase 2: Verarbeitung der Aufgabendefinition . . . . .	69
4.3	Phase 3: Ausgabe der Roboter- und Scannerbahnen . . . . .	69
4.3.1	Simulation . . . . .	69
4.3.2	Fertigung . . . . .	70
4.3.3	Offline-Nachteachen . . . . .	71

4.4	Beispielhafte Versuchsaufgabenstellung . . . . .	72
4.4.1	Beschreibung eines Versuchsbauteils . . . . .	73
4.4.2	Beschreibung einer Fertigungszelle . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laser-</b>	
	<b>strahlbearbeitung</b>	<b>77</b>
5.1	Schritt 1: Analyse der Aufgabe . . . . .	77
5.1.1	Verarbeitung des Aufgabenmodells . . . . .	77
5.1.2	Berechnung der Aufgabenumkreise . . . . .	81
5.1.3	Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 1	83
5.2	Schritt 2: Auswahl der Systemkomponenten . . . . .	83
5.2.1	Relativbewegung zwischen Werkstück und Scanneroptik . . . . .	84
5.2.2	Wahl der Handhabungskinematik . . . . .	87
5.2.3	Reihenfolgeoptimierung . . . . .	87
5.2.4	Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 2	89
5.3	Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik . . . . .	90
5.3.1	Bahnen beim RAC . . . . .	90
5.3.1.1	Vorwärtsplanung . . . . .	91
5.3.1.2	Rückwärtsplanung . . . . .	96
5.3.1.3	Längenoptimierung . . . . .	97
5.3.1.4	Geschwindigkeitsoptimierung . . . . .	98
5.3.1.5	Finalisierung der Bahn der Handhabungskinematik . . . . .	100
5.3.1.6	Anpassung der Bahnen auf 3D-Aufgaben- teile . . . . .	100
5.3.2	Bahnen beim RFC und RLW . . . . .	101
5.3.2.1	Skalierung . . . . .	102
5.3.2.2	Filterung mittels Tiefpass . . . . .	104
5.3.2.3	Bahninterpolation . . . . .	105
5.3.2.4	Geschwindigkeitsberechnung . . . . .	105
5.3.2.5	Iterative Bahnoptimierung . . . . .	106
5.3.2.6	Anpassung der Bahnen auf 3D-Aufgaben- teile . . . . .	107
5.3.2.7	Abgleich mit der realen Bahn . . . . .	108
5.3.3	Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 3	109
5.4	Schritt 4: Berechnung der Bahnen für die Scanneroptik .	110
5.4.1	Scannerbahn für das RAC . . . . .	111
5.4.2	Scannerbahn für das RFC und RLW . . . . .	111

5.4.3	Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 4	116
5.5	Schritt 5: Steuerungstechnische Umsetzung . . . . .	116
5.5.1	Lasersicherheitsaspekte . . . . .	117
5.5.2	Postprozessoren . . . . .	118
5.5.3	Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 5	118
<b>6</b>	<b>Technische und wirtschaftliche Betrachtung</b>	<b>119</b>
6.1	Technische Betrachtung . . . . .	119
6.1.1	Funktionsmuster 1: Ebenes Blech/Abgasanlagen- dichtungen . . . . .	119
6.1.2	Funktionsmuster 2: FVK-Strukturbauteil . . . . .	124
6.1.3	Funktionsmuster 3: Wärmetauscher . . . . .	126
6.2	Wirtschaftliche Betrachtung des Funktionsmusters 3 . .	132
6.3	Technische und wirtschaftliche Bewertung . . . . .	137
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	139
7.2	Ausblick . . . . .	141
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>
	<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>165</b>



# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AG	Aktiengesellschaft
AK	Aufgabenumkreis
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bzgl.	Bezüglich
bzw.	Beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design – Rechnerunterstütztes Konstruieren
CAM	Computer Aided Manufacturing – Rechnerunterstützte Fertigung
cb	Codebook des Lloyds-Algorithmus
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CNC	Computerized Numerical Control – Computergestützte numerische Steuerung
DH	Denavit-Hartenberg
E/A	Ein- und Ausgang
EF	End-Funktion
FHG	Freiheitsgrad
FVK	Faserverbund-Kunststoffe
ggf.	Gegebenenfalls
$K$	Kontur des Aufgabenteils
$K^*$	Kontur des Aufgabenteils, verkleinert und geglättet
KB	Kreisbogen
KS	Koordinatensystem

## Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	Bedeutung
LARISSA	LaserRobotik – Integration von Scan- und Fokussiereinheiten als hochdynamische System-Achsen
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Lichtverstärkung durch stimulierte Emission
LC	Laser Cutting – Laserstrahlschneiden
LF	Längen-Funktion
LIN	Lineare Roboterbewegung
LW	Laser Welding – Laserstrahlschweißen
M	Geometrischer Mittelpunkt eines Aufgabenteils
MaBriLas	Materialbearbeitung mit brillanten Laserstrahlquellen
P	Pose der Handhabungskinematik; Position des Roboterflansches
P&S	Point & Shoot – Statische Bearbeitung mit einer Scanneroptik
PTP	Point to Point Bewegung – Punkt zu Punkt Bewegung
RAC	Remote Laser Ablation Cutting – Remote-Laserstrahl-Abtragsschneiden
RFC	Remote Laser Fusion Cutting – Remote-Laserstrahl-Schmelzdruckschneiden
RLW	Remote Laser Welding – Remote-Laserstrahlschweißen
RLWW	Remote Laser Wobble Welding – Remote-Laserstrahl-Wobbelschweißen
RoboLaSS	Roboter geführter Laser zum Schweißen und Schneiden
SF	Start-Funktion
SOP	Start of Production – Produktionsstart
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm – Horizontal-Gelenkarmroboter

---

Abkürzung	Bedeutung
SPP	Strahlparameterprodukt
TCP	Tool Center Point – Arbeitspunkt eines Industrieroboters
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
Temp	Temporär, Kennzeichnung von Hilfsvariablen
TSP	Travelling Salesman Problem – Problem des Handlungsreisenden
u. a.	unter anderen
usw.	und so weiter
VW	Volkswagen
z. B.	zum Beispiel



# Symbolverzeichnis

Variable	Einheit	Bedeutung
$\alpha, \Phi$	$^\circ$	Denavit-Hartenberg Parameter
$a, d$	$mm$	Denavit-Hartenberg Parameter
$\beta$	$^\circ$	Einstrahlwinkel, lateral
$\gamma$	$^\circ$	Einstrahlwinkel, longitudinal
$\delta$	$^\circ$	Minimaler Winkel zwischen zwei Bahnabschnitten
$\lambda$	$\mu m$	Wellenlänge der Laserstrahlquelle
$\eta$	—	Summe der Optimierungskriterien
$\Phi_i$	$^\circ$	Winkel der Achse $i$
$\Psi$	$mm^2$	Gültiger Bereich zur Bearbeitung des Aufgabenteils
$\Psi_K$	$mm^2$	Größter gültiger Kreis zur Bearbeitung des Aufgabenteils
$\Psi_e$	$mm^2$	Einschränkung bei der Vereinfachung auf einen Kreis
$\tau$	—	Skalierungsfaktor
$\theta_E$	$mrad$	Divergenz des Laserstrahls am Ende der Lichtleitfaser
$\theta_f$	$mrad$	Divergenz des fokussierten Laserstrahls
$\omega(z)$	$mm$	Laserstrahldurchmesser an der Stelle $z$
$\xi$	$^\circ$	Richtung vom 1. zum 2. Aufgabenteil
$\overline{Temp}$	—	Darstellung für einen Vektor
$Temp^T$	—	Transponiert

## Symbolverzeichnis

---

Variable	Einheit	Bedeutung
$A$	$\text{mm}^2$	Anbindungsquerschnitt Schweißnaht
$A$	$\text{mm}$	Amplitude beim RLWW
$b, h$	$\text{mm}$	Breite und Höhe eines Aufgabenteils
$d_e$	$\text{mm}$	Laserstrahldurchmesser am Faserende
$d_f$	$\text{mm}$	Laserstrahldurchmesser im Fokus
$d_L$	$\text{mm}$	Laserstrahldurchmesser auf der Fokussierlinse
$E_S$	$\text{kW}\cdot\text{s}/\text{mm}$	Streckenenergie
$f$	$\text{Hz}$	Frequenz beim RLWW
$l_{\text{Aufgabenteil},i}$	$\text{mm}$	Länge des Aufgabenteils $i$
$l_{\text{Laser},i}$	$\text{mm}$	Strecke, welche die Handhabungs-kinematik zurücklegt, während der Bearbeitung des Aufgabenteils $i$
$L$	—	Anzahl der Lösungen des TSP
$m$	—	Benötigte Freiheitsgrade der Aufgabe, Anforderung des Prozesses
$M^2$	—	Beugungsmaßzahl
$n$	—	Anzahl, je nach Zusammenhang: Anzahl an Städten, an Belichtungen beim RAC, der Freiheitsgrade des Roboters
$P_L$	$\text{kW}$	Emittierte Leistung der Laserstrahlquelle
$r$	—	Grad der Redundanz
$t$	$\text{s}$	Zeit
$t_{\text{Aufgabenteil},i}$	$\text{s}$	Zeit zum Bearbeiten des Aufgabenteils $i$
$v$	$\text{mm}/\text{s}$	Geschwindigkeit
$z_e$	$\text{mm}$	Abstand Faserende zu Fokussierlinse
$z_f$	$\text{mm}$	Abstand Fokussierlinse zu Brennfleck
$z_R$	$\text{mm}$	Rayleigh-Länge

# 1 Einleitung

Das Laserstrahlschweißen<sup>1</sup> und das Laserstrahlschneiden haben sich in vielen Industriezweigen als wirtschaftliche Fertigungsverfahren etabliert (HÜGEL & GRAF 2009). Beide Verfahren werden kontinuierlich weiterentwickelt, um den steigenden Anforderungen an die Qualität der Bearbeitung und an die Produktivität zu genügen. Vor allem die Automobil-Industrie setzt auf neue Laserstrahlverfahren, wie das Remote-Laserstrahlschweißen<sup>2</sup> (Remote Laser Welding, RLW), um die Taktzeiten zu verbessern (HAVRILLA ET AL. 2011). Neben dem RLW bietet auch das Remote-Laserstrahl-Abtragsschneiden (Remote Laser Ablation Cutting, RAC) große Potenziale, die Fertigungszeiten zu verkürzen (LÜTKE 2011). Durch den großen Abstand zwischen der laserstrahlformenden Optik und dem Werkstück können bei Remote-Verfahren die Laserstrahlpositionierungszeiten, die unproduktiven Nebenzeiten, deutlich verringert werden (MUNZERT 2010). Weitere Vorteile beider Verfahren sind die hohen Prozessgeschwindigkeiten und die gute Qualität der Schweißnähte bzw. der Schnittkanten bei beliebigen Bearbeitungsmustern (DIN 1011-6 2006). Um diese Vorteile zu nutzen, ist es erforderlich, den Laserstrahl zielgenau durch eine Handhabungskinematik auf dem Werkstück zu positionieren. Die vorliegende Dissertation befasst sich daher mit der automatisierten Bahnplanung für Kombinationen von Handhabungskinematiken wie Industrieroboter oder Portalanlagen mit laserstrahlformenden Scanneroptiken, welche gegenwärtig in vielen Applikationen bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung eingesetzt werden.

Anhand des industriellen Einsatzes von Laserstrahlfertigungsverfahren in Deutschland und eines Überblicks über Industrieroboter wird in diesem Kapitel die Motivation für die vorliegende Dissertation hergeleitet.

---

<sup>1</sup>Die Abkürzung *Laser* steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. Dies entspricht der „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission“; ein von Albert Einstein 1916 postuliertes Prinzip (EINSTEIN 1916).

<sup>2</sup>Das Wort *Remote* stammt aus dem Englischen und steht für *fern*, *abseits*.

### 1.1 Laserstrahlfertigungsverfahren am Standort Deutschland

Eine treibende Kraft beim Einsatz von neuen Laserstrahlfertigungsverfahren in Deutschland ist die Automobil-Industrie. Die weltweit erste von Laserstrahlquellen betriebene Schweißanlage wurde in den 1980er Jahren bei der VW AG aufgebaut (FISCHER 2010). Seitdem hat sich der Einsatz von Laserstrahlung in der Fertigung stark ausgebreitet und ist durch zahlreiche Veröffentlichungen von nahezu allen Automobil-Herstellern und deren Zulieferer belegt (BAUR 2009; BECKER ET AL. 2008; BERGMANN 2009a; ELSNER 2008; HAMMER & BROCKMANN 2006; HAVRILLA ET AL. 2011). Die Flexibilität des Werkzeugs *Laserstrahl* macht diese Technologie in vielen anderen Anwendungsgebieten, wie zum Beispiel dem Schiffsbau (GRUPP 2006) und dem Pipelinebau (GOOK ET AL. 2009), unverzichtbar.

Viele dieser industriellen Anwendungen basieren auf den Ergebnissen von Forschungsprojekten. Eine stetige Verbesserung der Laserstrahlquellen hat den Fokus dieser Projekte von den Grundlagen der Laserstrahlerzeugung und seiner Formung auf die Materialbearbeitung erweitert (BACHMANN 2010). Durch die intensive Forschung im Bereich der Lasertechnik und speziell bei den Laserstrahlfertigungsverfahren in Deutschland stehen der Industrie immer wieder neue Laserstrahlprozesse, wie das RAC (LÜTKE 2011), sowie flexible Fertigungszellen mit mehreren Prozessen (MUSIOL ET AL. 2012) zur Verfügung, um die Produktivität und die Qualität zu steigern.

In diesen Fertigungszellen können Industrieroboter als Handhabungskinematiken zur Positionierung der laserstrahlformenden Optiken eingesetzt werden. Eine Remote-Laserstrahlanlage, bestehend aus einem Industrieroboter und einer Scanneroptik, ist zusammen mit Momentaufnahmen beim RAC in Abbildung 1.1 dargestellt. Die freie und hochgenaue Ausrichtung der Scanneroptik im Arbeitsraum von modernen Industrierobotern schafft reproduzierbare Versuchsbedingungen und gewährleistet in der Großserienproduktion eine konstante Qualität der gefertigten Werkstücke. Der Industrieroboter kann damit in vielen Anwendungen ein zentrales Element bei der Laserstrahlbearbeitung darstellen.



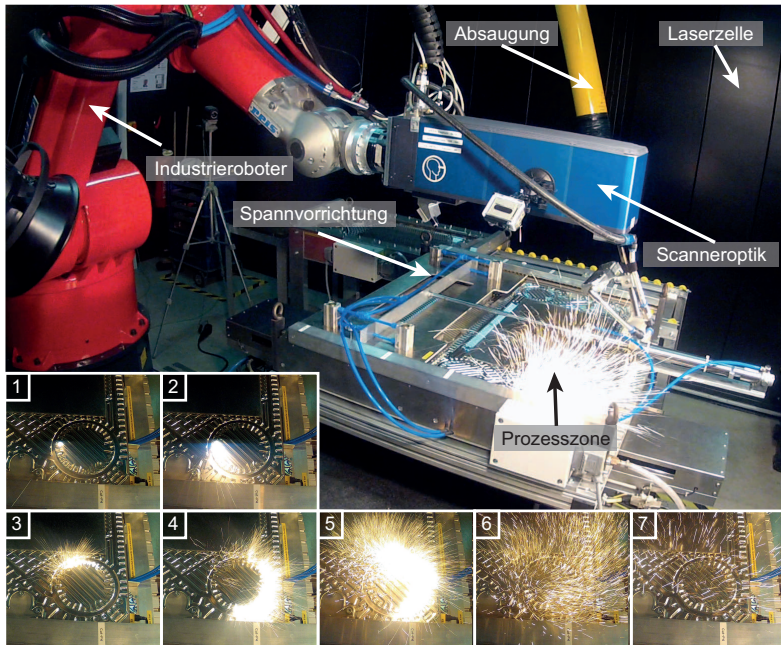


Abbildung 1.1: Versuchsaufbau bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung mit einer beispielhaften Fertigungssequenz einer Belichtung der Schnittkante beim RAC mit sieben Momentaufnahmen

## 1.2 Überblick über Industrieroboter

Der Mensch überträgt seit Jahrhunderten schwere körperliche Arbeit an Maschinen. Dieser Automatisierungsgedanke hat immer flexiblere Systeme hervorgebracht, welche seit 1960 mit dem ersten Auftreten von Industrierobotern versuchen, den Menschen, bzw. dessen Körperteile wie seinen Arm, direkt nachzubilden (CRAIG 1988). Das Wort *Roboter* stammt vom tschechischen Wort Robot ab und bedeutet *Lehnarbeiter*. Es wurde bereits 1921 im Rahmen eines Theaterstücks eingeführt (CAPEK 1921). Ein Roboter ist in DIN 8373 (1996) definiert als ein System mit mindestens drei programmierbaren Achsen. Roboter werden derzeit für nahezu

jeglichen industriellen Einsatz produziert und der Begriff *Industrieroboter* bezeichnet häufig Vertikal-Knickarm-Roboter mit sechs Achsen, wie in Abbildung 1.1 dargestellt. Sie zeichnen sich durch eine große Flexibilität aus, da sie mit sechs frei programmierbaren Achsen Positionen in ihrem 3D-Arbeitsraum mit definierten Orientierungen anfahren können.

Seit dem ersten Auftreten von Industrierobotern hat sich ihre Qualität stark verbessert. Lagen die Genauigkeiten der ersten Roboter noch bei mehreren Zentimetern bei geringen Nutzlasten (WEBER 2002), können heutzutage hochgenaue Roboter Nutzlasten bis zu 60 kg mit einer Wiederholgenauigkeit von 50  $\mu\text{m}$  positionieren (KUKA ROBOTER GMBH 2012). Zudem hat sich das Spektrum an Robotersystemen von der Mikromontage (Tragkraft von wenigen Gramm) bis in den Schwerlastbereich (Tragkraft von über einer Tonne (FANUC ROBOTICS GMBH 2013)) erweitert (WEBER 2002).

Hochgenaue Roboter bieten somit die Möglichkeit, weitere Kinematiken, wie zum Beispiel laserstrahlformende Scanneroptiken, über Werkstücken zu positionieren, um die Laserstrahlprozesse im gesamten Arbeitsraum des Roboters auszuführen.

### 1.3 Motivation

Durch die berührungslose sowie kräfte- und verschleißfreie Wirkungsweise besitzt die Laserstrahlbearbeitung ein großes Potenzial, um automatisiert in der Produktion eingesetzt zu werden. Da sich eine Laserstrahlquelle zur Realisierung verschiedener Prozesse (Schweißen, Schneiden, Markieren, usw.) eignet (MUSIOL ET AL. 2012; PETRING ET AL. 2005; SCHNEIDER ET AL. 2005; ULRICH 2006), kann eine Laserstrahlfertigungszelle sehr flexibel in der Kleinserienproduktion zur Anwendung kommen, da Rüstzeitanteile zum Wechsel von Hardware-Komponenten zur Laserstrahlformung sowie -positionierung entfallen und somit keine wertvolle Produktionszeit verloren geht. Die hohen Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 150 mm/s (9 m/min) beim Schweißen und bis zu 8000 mm/s (480 m/min) beim RAC dünner Metallfolien bieten zudem eine gute Möglichkeit, die Taktzeit bei der Großserienproduktion erheblich zu reduzieren. Die hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten beim RAC werden gegenwärtig ausschließlich mit Scanneroptiken erreicht. Sie

realisieren Versatzbewegungen des Laserstrahlfokus auf dem Werkstück mit Hilfe von bewegten Spiegeln mit bis zu 20 000 mm/s (1200 m/min), bei Wiederholgenauigkeiten, die kleiner als 5  $\mu\text{m}$  sind (ARGES GMBH 2012). Nebenzeiten, während derer der Laserstrahl ausgeschaltet ist und die Spiegel von einer Schweißnaht oder Schnittkante zur nächsten ausgerichtet werden, sind damit vernachlässigbar klein. Scanneroptiken besitzen aber meist nur ein kleines Bearbeitungsfeld von bis zu  $400 \times 400 \text{ mm}^2$ . Um das Bearbeitungsfeld von Scanneroptiken zu erweitern, können diese an Industrieroboter montiert werden (vgl. Abbildung 1.1).

Die Hersteller von Scanneroptiken und Industrierobotern stellen meist intuitive Benutzerschnittstellen für die manuelle Programmierung ihrer Systeme zur Verfügung. Sofern die Scanneroptik den Laserstrahl ablenkt, während sie vom Roboter positioniert wird, liegt eine kombinierte Bewegung von zwei unterschiedlichen Systemen vor. In diesem Fall wird von einer *fliegenden* bzw. von einer *on-the-fly* Bewegung gesprochen. Bei der fliegenden Bewegung ist eine automatisierte Programmierung unerlässlich, da die Scanneroptik sonst programmiert werden müsste, während sich der Roboter bewegt. Für den Einsatz des RLW gibt es Speziallösungen mit Benutzerschnittstellen für die Programmierung beider Hardware-Komponenten. Diese im industriellen Einsatz etablierten Systeme benötigen allerdings zusätzliche Hardware (BECKER ET AL. 2008; VOGL & MUNZERT 2012), sind nur für eine eingeschränkte Auswahl an Systemen einsetzbar und eignen sich aufgrund eines zu langsamen Datenaustausches zwischen den unterschiedlichen Systemen (BECKER ET AL. 2008) nicht für das RAC.

Um das RAC oder Prozesskombinationen (RAC und RLW) in der industriellen Fertigung einzusetzen, bedarf es Programmiersysteme mit automatisierten Bahnplanungsmethoden, welche die Vorteile von Industrierobotern und Scanneroptiken verwenden, um Werkstücke mit einer möglichst kurzen Taktzeit zu bearbeiten. Bisher stehen keine Bahnplanungsmethoden zur Verfügung, um Systeme von unterschiedlichen Industrierobotern und Scanneroptiken für das RAC sowie Prozesskombinationen intuitiv, schnell und flexibel zu programmieren.

Die Motivation zur Erstellung der vorliegenden Dissertation ist es, Methoden für den Einsatz von RAC oder Prozesskombinationen zu entwickeln, um diesen neuen Prozess im industriellen Umfeld einsetzen zu können.

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Nach der Darlegung der Motivation zur Anfertigung dieser Dissertation wird im Kapitel 2 der zugehörige Stand der Technik der robotergeführten Laserstrahlbearbeitung beschrieben. Dabei wird auf die zu betrachteten Prozesse, das Laserstrahlschweißen und -schneiden sowie auf die Anforderungen der Laserstrahlpositionierung bei diesen Prozessen eingegangen. Ein Vergleich der Laserstrahlprozesse zeigt dann die erforderliche Systemtechnik auf, um verschiedene Prozesse in einer Laserstrahlfertigungszelle zur Anwendung zu bringen. Aufbauend auf dem Prozesswissen wird für das RAC die derzeit einzig mögliche Laserstrahlquelle, der Grundmode-Faserlaser, vorgestellt. Anschließend werden vorhandene laserstrahlformende Optiken und Industrieroboter aufgezeigt, mit deren Hilfe der Laserstrahl auf dem Werkstück positioniert wird. Eine Beschreibung zur Verfügung stehender Bahnplanungsmethoden für die Laserstrahlbearbeitung bei unterschiedlichen Prozessen schließt den Stand der Technik ab.

Basierend auf einer Diskussion des Stands der Technik in Kapitel 3 werden im Handlungsbedarf fehlende Bahnplanungswerkzeuge für das RAC unter Verwendung standardisierter Komponenten, wie Laserstrahlquelle, Scanneroptik und Industrieroboter identifiziert. Aus dem Handlungsbedarf wird danach die Zielbeschreibung und die Vorgehensweise abgeleitet. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Erweiterung des Stands der Technik und vorhandener Programmiersysteme mit einer Bahnplanungsmethode, um den neuen Laserstrahlprozess RAC sowie Prozesskombinationen im industriellen Umfeld anzuwenden.

In Kapitel 4 wird ein Programmiersystem vorgestellt, welches auf dem Stand der Technik aufbaut und vorhandene Benutzerschnittstellen verwendet, um die Anwenderprogramme für die Remote-Laserstrahlanlage im Rahmen einer aufgabenorientierten Programmierung zu erstellen. Die Beschreibung der im Programmiersystem benötigten automatisiert ablaufenden Bahnplanungsmethode für das RAC und das RLW erfolgt in Kapitel 5, welches den Hauptteil dieser Arbeit darstellt. Eine Validierung an drei unterschiedlichen Funktionsmustern mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt im sechsten Kapitel dieser Dissertation den Nutzen für eine industrielle Anwendung. Im abschließenden Kapitel 7 wird nach einer Zusammenfassung ein kurzer Ausblick auf weiterführende Forschungsansätze gegeben.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Nachdem die erste Laserstrahlquelle 1960 in Betrieb genommen wurde (MAIMAN 1960), hat sich der Einsatz von Laserstrahlung in den unterschiedlichsten Bereichen, wie z. B. der Wissenschaft und Technik, der Medizin (z. B. Knochenschneiden (Laserosteotomie) (KAHRS 2009)) und dem Haushalt (z. B. CD-Player, Laserdrucker), etabliert (FISCHER 2010). Gerade in der Produktionstechnik ist die Laserstrahlung mit ihrer Flexibilität ein unverzichtbares Werkzeug und eine Laseranlage (siehe Abbildung 2.1) bietet gegenwärtig vielfältige Möglichkeiten, Produkte schnell und hohen Qualitätsanforderungen entsprechend zu fertigen (HÜGEL & GRAF 2009).

Ausgehend von einer Laseranlage, wie sie in der DIN 11145 (2008) genormt und in Abbildung 2.1 dargestellt ist, wird in diesem Kapitel der Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der robotergeführten Remote-Laserstrahlbearbeitung beschrieben. Dies umfasst, mit Fokus auf den Eigenschaften, die für eine automatisierte Bahnplanung bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung von Bedeutung sind, die Grundlagen des Laserstrahlschweißens und -schneidens. Nach der Beschreibung der Anforderungen der Prozesse an die Systemtechnik wird die Laseranordnung, bestehend aus Laserstrahlquelle und strahlformenden Optiken, vorgestellt. Eine Betrachtung von Industrierobotern mit ihren unterschiedlichen Programmierarten und vorhandenen Bahnplanungsmethoden zur Realisierung der Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück schließt dieses Kapitel ab.

### 2.1 Laserstrahlprozesse

In der Produktionstechnik kommt Laserstrahlung bei den unterschiedlichsten Prozessen zum Einsatz. Neben dem Laserstrahlschneiden und -schweißen metallischer Werkstoffe können Laserstrahlen beispielsweise auch zum Biegen komplexer Aluminiumstrukturen (HORNFECK 2008)

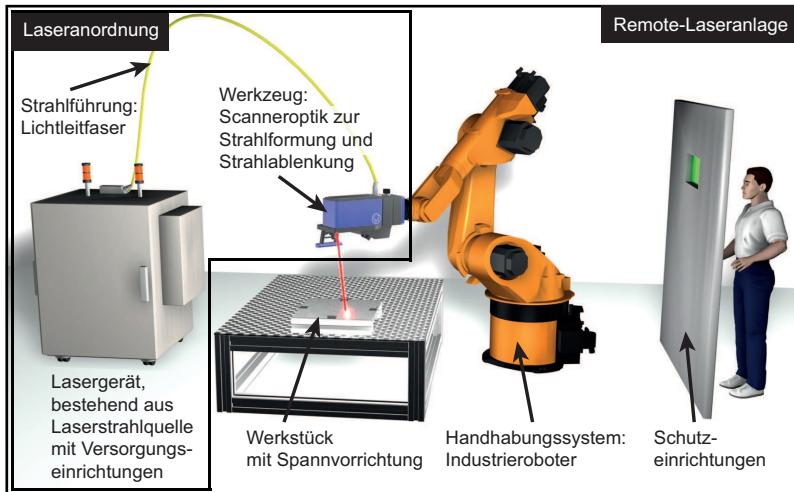


Abbildung 2.1: Remote-Laserstrahlfertigungsanlage, in Anlehnung an HÜGEL & GRAF (2009), MUNZERT (2010) und DIN 11145 (2008)

und zum Messen (LUDWIG 2011) eingesetzt werden. Alle Prozesse eignen sich für eine Anwendung in der automatisierten Fertigung aufgrund der berührungslosen Wirkungsweise zur Bearbeitung von Werkstücken. Bevor auf das Laserstrahlschweißen und -schneiden näher eingegangen wird, ist eine Vorstellung unterschiedlicher Laserstrahlpositionierkonzepte nötig, da durch sie Varianten der beiden Laserstrahlprozesse eingeordnet werden können. Die unterschiedlichen Laserstrahlfertigungsprozesse sind ausführlich beschrieben in HÜGEL & GRAF (2009) und STEEN & MAZUMDER (2010). In POPRAWE (2005) werden zudem noch Anwendungsbeispiele aufgezeigt.

### 2.1.1 Einordnung von Laserstrahlprozessen anhand von Laserstrahlpositionierkonzepten

Die Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl kann auf zwei unterschiedliche Arten realisiert werden. Einerseits ist es möglich, die Optik über dem Werkstück zu bewegen, während das Werkstück ortsfest

eingespannt ist, wobei in der Regel Industrieroboter oder Portalanlagen zum Einsatz kommen. Andererseits kann das Werkstück bewegt werden. Dies geschieht meist mit Linear-Kinematiken (RIPPL 1995) oder auf Förderbändern (KLOTZBACH ET AL. 2009). In Abbildung 2.2 sind Beispiele der unterschiedlichen Handhabungskinetiken und Laserstrahlfokussieroptiken dargestellt, welche derzeit im industriellen Umfeld Verwendung finden (EMMELMANN 2005; MUNZERT 2010).

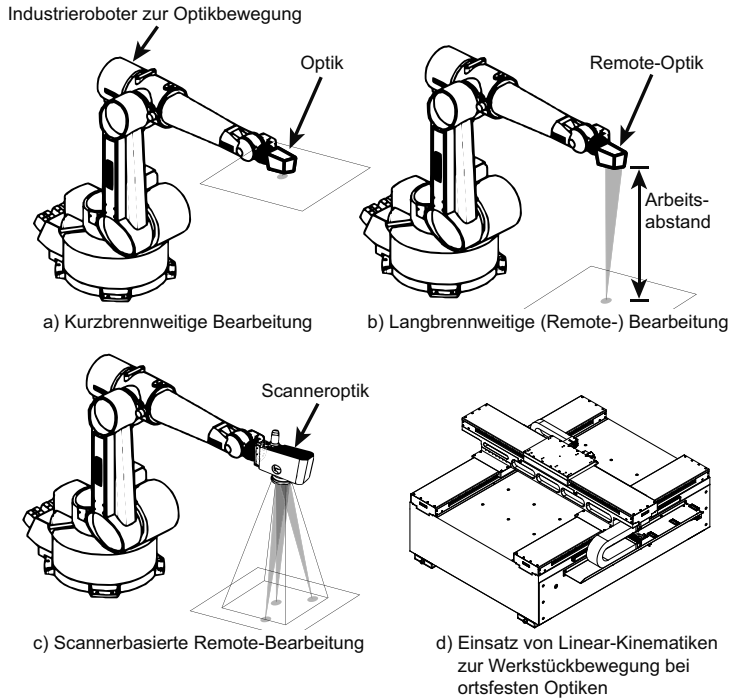


Abbildung 2.2: Prinzipskizzen der verschiedenen Arten von Laserstrahlfokussier- und Laserstrahlpositionierkonzepten nach EMMELMANN (2005) und MUNZERT (2010)

Neben den verschiedenen Handhabungskinetiken dient die Distanz zwischen der laserstrahlformenden Optik und dem Werkstück, dem sogenannten Arbeitsabstand, als Unterscheidungskriterium der Prozessvarianten. Beim kurzbrennweitigen Laserstrahlschweißen und -schneiden wird die laserstrahlformende Optik mit einem Abstand von wenigen Mil-

limetern über dem Werkstück entlang geführt (siehe Abbildung 2.2 a), da die Strahlqualität keine Fokussierung auf größere Distanzen erlaubt. Die Verbesserung der Qualität der Laserstrahlquellen in den letzten Jahren ermöglicht es, auch mit großen Abständen einen Laserstrahl auf dem Werkstück so stark zu fokussieren, dass metallische Werkstoffe geschweißt oder geschnitten werden können (siehe Abbildung 2.2 b, c). Mit dem Zusatz *Remote* werden Verfahren bezeichnet, deren Arbeitsabstand um ein Vielfaches größer ist, als dies bei der gegenwärtigen konventionellen Bearbeitung mit kurzbrennweitigen Optiken der Fall ist (LÜTKE 2011). Definierte Grenzen sind in der Literatur nicht beschrieben bzw. variieren je nach Anwendung.

Der Versatz der Optik zwischen zwei Schweißnähten oder Schnittkanten muss bei der kurzbrennweitigen Laserstrahlbearbeitung durch eine translatorische Bewegung der Handhabungskinematik realisiert werden (siehe Abbildung 2.2 a). Bei großen Versatzbewegungen entstehen so unproduktive Prozessnebenzeiten (RIPPL 1995). Die Optik ist durch den geringen Abstand zur Prozesszone neben der Gefahr von Kollisionen mit dem Werkstück auch direkt Spritzern und Schmauch (siehe Abbildung 1.1) ausgesetzt, welche beim Schweißen und Schneiden entstehen und die Linsen gefährden.

Bei großen Arbeitsabständen können die Strahlpositionierungszeiten deutlich reduziert werden, da schon kleine Ablenkungen des Laserstrahls in der Optik, z. B. durch eine Orientierungsänderung der Handhabungskinematik, zu großen Versatzbewegungen des Laserstrahlfokus auf dem Werkstück führen (THOMY ET AL. 2004). Bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung können zudem unterschiedliche Laserstrahlpositioniersysteme zum Einsatz kommen. Zum einen kann die gesamte Laserstrahlpositionierung durch die Handhabungskinematik, z. B. aus den Roboterachsen, erfolgen (siehe Abbildung 2.2 b). Des Weiteren kann die laserstrahlformende Optik zusätzliche Freiheitsgrade für eine lokale Laserstrahlpositionierung aufweisen, wie z. B. die Achsen (Spiegel) von Scanneroptiken (siehe Abbildung 2.2 c).

Bei der Laserstrahlbearbeitung ist die zielgenaue Positionierung des Laserstrahlfokus auf dem Werkstück eine große Herausforderung, da der Arbeitsabstand und die Bearbeitungsgeschwindigkeit eingehalten werden müssen. Diese Parameter und weitere Anforderungen der Prozesse an die Handhabungskinematik werden in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet.



### 2.1.2 Das Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen bietet viele Vorteile gegenüber anderen Schweißverfahren. Diese spiegeln sich vor allem in der hohen Qualität der Schweißnähte wider, den hohen Prozessgeschwindigkeiten und der Möglichkeit, den Prozess durch die berührungslose und damit kräftefreie Wirkweise zu automatisieren.

Nach der DIN 8593-6 (2003) wird das Laserstrahlschweißen den Schmelzschweißverfahren durch Strahlung zugeordnet, in der vierten Hauptgruppe der Fertigungsverfahren: Fügen (DIN 8580 2003). Beim Schmelzschweißen werden die Fügeflächen von einem Energieträger, in diesem Fall die Laserstrahlung, lokal aufgeschmolzen. Die dazu nötige Wärmeenergie wird in Form von Strahlung durch eine Energieumsetzung innerhalb des Werkstücks erzeugt (DIN 14610 2005).

Das Laserstrahlschweißen kann prozessspezifisch in das Wärmeleitungsschweißen und in das Tiefschweißen unterteilt werden (POPRAWA 2005). Beim Wärmeleitungsschweißen wird das Material durch den Laser erhitzt und aufgeschmolzen. Die maximale Einschweißtiefe ist dabei auf ein bis zwei Millimeter beschränkt, da die Energie des Laserstrahls nur durch den Effekt der Wärmeleitung in das Werkstück eindringen kann (DAUB 2012). Beim sogenannten Tiefschweißen wird durch den Laserstrahl eine Dampfkapillare geöffnet, das Keyhole (siehe Abbildung 2.3). Dadurch kann die Energie des Laserstrahls durch Mehrfachreflexion weiter in das Material eindringen als es durch Wärmeleitung möglich ist und es können Schweißnähte bis zu einem Zentimeter Einschweißtiefe erzeugt werden (GRUPP 2006; HÜGEL & GRAF 2009). Zudem sind höhere Prozessgeschwindigkeiten möglich. Der Laserstrahl wird in der Dampfkapillare an den Wänden mehrfach reflektiert und absorbiert. Damit steht der Großteil der Energie für den Prozess zur Verfügung und nur wenige Prozent werden nach außen hin als Verlustleistung reflektiert oder beim Durchschweißen transmittiert. Im weiteren Verlauf dieser Dissertation wird mit dem Begriff Laserstrahlschweißen nur noch das Tiefschweißen bezeichnet, da dieser Prozess vor allem beim RLW zum Einsatz kommt.

Die Bearbeitungsgeschwindigkeit beim Laserstrahlschweißen liegt meist zwischen 50 und 150 mm/s (3 und 9 m/min). Hochgeschwindigkeitsschweißen mit Bearbeitungsgeschwindigkeiten bis zu 500 mm/s (30 m/min) bei dünnen Blechen ist in BEYER ET AL. (2003) beschrieben.

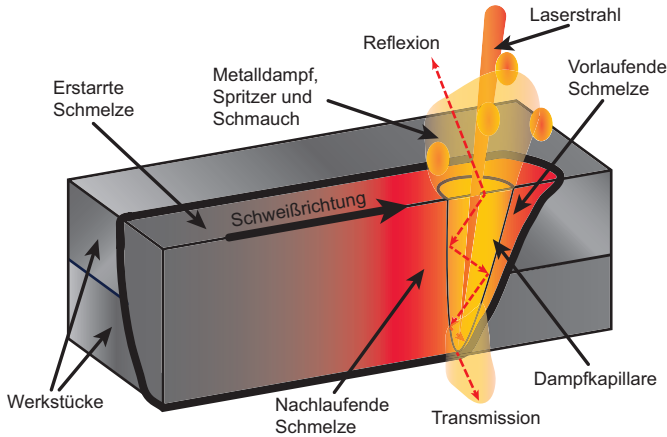


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Tiefschweißprozesses, in Anlehnung an HERING & MARTIN (2006) und HÜGEL & GRAF (2009)

Die Einschweißtiefe nimmt mit Zunahme der Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Prozess}}$  ab (GRUPP ET AL. 2003; ZÄH ET AL. 2007). Sie ist abhängig vom Material, der Blechdicke, den Eigenschaften der Laserstrahlquelle (z. B. der emmitierten Leistung  $P_L$ ) und der eingebrachten Streckenenergie  $E_S$  nach Gleichung (2.1) (OEFELE 2012).

$$E_S = \frac{P_L}{v_{\text{Prozess}}} \quad (2.1)$$

Das Laserstrahlschweißen hat bei vielen Anwendungen andere Schweißverfahren ersetzt, da z. B. die mögliche Bearbeitungsgeschwindigkeit von mehreren m/min Vorschub deutlich höher liegt als bei Lichtbogen-schweißverfahren. Im Gegensatz zum Widerstandspunktschweißen werden beim Laserstrahlschweißen nicht nur einzelne Schweißpunkte gesetzt, sondern es werden in der Regel kurze Steppnähte beliebiger Konturen gezogen. Diese bieten bessere Festigkeiten, da die Form der Steppnähte der Belastung des Werkstücks im späteren Einsatz angepasst werden kann (BECKER ET AL. 2004; HAVRILLA ET AL. 2011; OEFELE 2012). Ferner können lange Durchgangsnähte gezogen werden, die auch zum Abdichten dienen können, wie z. B. im Schiffsbau (GRUPP 2006) und bei der Fertigung von Wärmetauschern (MUSIOL ET AL. 2012).

Ein weiterer Vorteil gegenüber vielen anderen Fügeverfahren ist, dass beim Laserstrahlschweißen eine einseitige Zugänglichkeit ausreicht. Die zu fügenden Werkstücke können mit unterschiedlichen Stoßgeometrien zueinander verspannt werden (siehe Abbildung 2.4). Beim Stumpf- und beim T-Stoß muss die Schweißnaht mit einer hohen Genauigkeit getroffen werden, damit beide Fügepartner aufgeschmolzen werden. Das Schweißen eines Überlappstoßes ist in Bezug auf die Genauigkeit toleranter, da es genügt, die Werkstücke im Bereich ihres Überlappens zu treffen. Diese Stoßgeometrie ist beim RLW die häufigste Verbindungsart (GRUPP ET AL. 2003). Trotzdem müssen bei allen Stoßgeometrien die Werkstücke sehr genau eingespannt werden, um eine hohe Schweißnahtqualität zu erhalten. Im Gegensatz zu anderen Fügeverfahren wie dem Widerstandspunktschweißen, können sie beim Laserstrahlschweißen und vor allem beim RLW in der Regel nicht durch das Werkzeug gegeneinander gepresst werden. Deshalb kommt der Spannvorrichtung eine besondere Bedeutung zu, da Spalte zwischen den zu fügenden Werkstücken nur schwer zu überbrücken sind (BERGMANN 2009a).

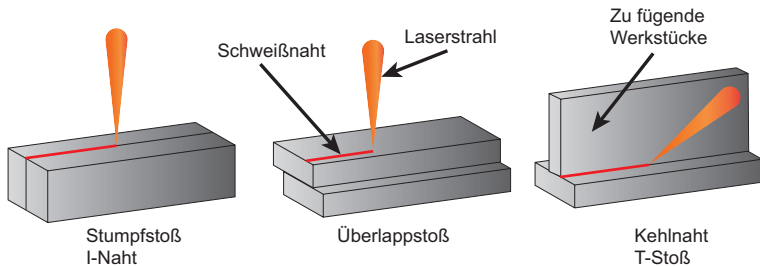


Abbildung 2.4: Stoßgeometrien beim Fügen, in Anlehnung an KOLLER (1993)

Laserstrahl geschweißte Nähte weisen eine sehr schlanke Schweißnahtform und damit ein hohes Aspektverhältnis auf, dessen Breite in der Größenordnung des Fokusbereichs des Laserstrahls liegt. Durch den konzentrierten Energieeintrag in das Werkstück reduziert sich darüber hinaus der thermisch bedingte Verzug im Vergleich zu Lichtbogenschweißverfahren (BERGMANN 2009a; LASER ZENTRUM HANNOVER E.V. 2002). Die Qualifizierung des thermischen Verzugs mit Hilfe von Simulationen ist zurzeit Gegenstand der Forschung (OTTO ET AL. 2011). Ein Ziel ist dabei eine optimierte

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

---

Reihenfolge für die Schweißnähte zu erhalten, um den thermischen Verzug im fertigen Werkstück so gering wie möglich zu halten.

Neben allen Vor- und Nachteilen des Prozesses sind zudem die hohen Kosten für die Anschaffung einer Laserstrahlschweißanlage zu berücksichtigen.

### 2.1.2.1 Laserstrahlschweißen mit kurzen Brennweiten

Der kleine Abstand zwischen der laserstrahlformenden Optik und dem Werkstück sowie Fokusbereich im Bereich von 400 bis 800 µm ermöglichen den Einsatz der meisten Laserstrahlquellen im Kilowatt-Bereich, auch günstige CO<sub>2</sub>- oder Diodenlaserstrahlquellen.

Die Vorteile der Nähe der Optik zum Werkstück sind beim Schweißen vor allem in der Möglichkeit einer direkten Zuführung von Schutzgas sowie Zusatzmaterial zu sehen. Zudem gibt es vereinzelt Systeme, die mit einer Rolle die zu fügenden Werkstücke aufeinander pressen und damit einen Spalt zwischen den zu fügenden Blechen schließen (RIPPL 1995).

Das Laserstrahlschweißen wird aktuell in breit gefächerten Anwendungsgebieten eingesetzt, wobei drei Anwendungen exemplarisch an dieser Stelle beschrieben werden. Für die Fertigung von Edelstahlseitenwandstrukturen für Schienenfahrzeuge im Eisenbahnbau eignet sich das Laserstrahlschweißen, da der thermische Verzug im Vergleich zum Widerstandspunktschweißen sehr gering ist und damit sichtbare Außenteile nicht nachbearbeitet werden müssen (LASER ZENTRUM HANNOVER E.V. 2002). Im Schiffsbau müssen sehr lange Durchgangsnähte gezogen werden, wofür vor allem die hohen Prozessgeschwindigkeiten von Vorteil sind (GRUPP 2006). Als dritte Anwendung kann der Pipeline-Bau genannt werden. In GOOK ET AL. (2009) wird das dichte Verschweißen von Rohren mit einem Durchmesser von 914 mm und einer Wandstärke von 16 mm beschrieben.

### 2.1.2.2 Remote-Laserstrahlschweißen

Durch die großen Arbeitsabstände beim RLW werden Nachteile des kurz-brennweitigen Laserstrahlschweißens, wie die Exposition der Optik durch

Prozessrauche, egalisiert, allerdings entstehen neue Herausforderungen, wie die zielgenaue Positionierung des Laserstrahls auf dem Werkstück.

Für qualitativ hochwertige Prozessergebnisse muss der Laserstrahl nicht senkrecht auf die Werkstückoberfläche auftreffen. Der Laserstrahl kann, wie in Abbildung 2.5 gezeigt ist, in Vorschubrichtung (longitudinal) um den Winkel  $\gamma$  angestellt werden oder in seitlicher (lateral) Richtung um den Winkel  $\beta$ . Beide Winkel spannen den sogenannten Schweißkegel auf. Die Optik muss sich innerhalb dieses Kegels befinden, damit die zulässigen maximalen Einstrahlwinkel eingehalten werden (BACKES 1997; MUNZERT 2010). Bis zu einem Winkel von  $\gamma = \pm 25^\circ$  und  $\beta = \pm 20^\circ$  kann der Einstrahlwinkel in der Regel variiert werden, ohne dass es zu signifikanten Einbußen bei der Schweißnahtqualität kommt (OEFELE 2012). Größere Einstrahlwinkel führen unter bestimmten Voraussetzungen ebenfalls noch zu akzeptablen Schweißnähten. Es können allerdings keine allgemeinen Aussagen zu maximalen Einstrahlwinkeln getroffen werden, da diese je nach Material, Spannvorrichtung und Laserstrahlquelle variieren (TSOUKANTAS ET AL. 2008). Daher muss der erlaubte Winkelbereich werkstückspezifisch ermittelt werden. Wird mit einem Einstrahlwinkel gearbeitet, bildet sich die Dampfkapillare entlang der Strahlachse aus (siehe Abbildung 2.3) und beeinflusst damit neben der Qualität auch die Lage und Ausrichtung der Schweißnaht im Werkstück (OEFELE 2012). Unter Einhaltung dieser Randbedingungen gilt es, die Laserstrahlpositionierung mit den Handhabungskinematiken zu realisieren, so dass eine hohe Auslastung der Laserstrahlquelle gewährleistet ist.

Beim RLW werden höhere Anforderungen an die Spannvorrichtung gestellt als beim kurzbrennweitigen Laserstrahlschweißen. Es kann kein Schutzgas oder Zusatzmaterial durch die Optik an die Schweißnaht geführt werden. Sollten solche prozessunterstützenden Maßnahmen nötig sein, muss dies in die Spannvorrichtung integriert werden. Ebenso kann dort eine Absaugung installiert werden, um prozessbedingte Schweißrauche aus dem Strahlenweg zwischen der Optik und dem Werkstück zu entfernen (OEFELE 2012). Spezielle Spannvorrichtungen, die sich für das Remote-Laserstrahlschweißen eignen, werden in BERGMANN (2009a, b) und MUNZERT (2010) gezeigt. Sie zeichnen sich durch eine robuste Bauweise aus, welche einem Verzug der Bleche entgegen wirkt.

Das Remote-Laserstrahlschweißen wird aufgrund seiner hohen Produktivität immer stärker in industriellen Anwendungen, hauptsächlich im

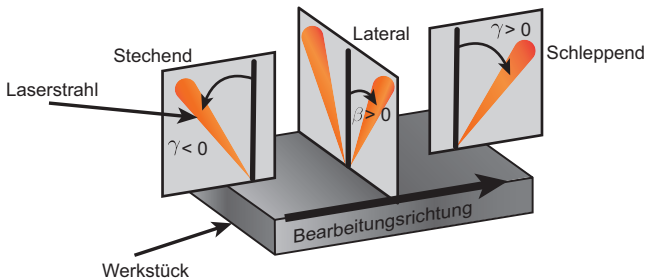


Abbildung 2.5: Unterteilung der Einstrahlwinkel in Abhängigkeit der Vorschubrichtung in Stechwinkel, Schleppwinkel sowie positive und negative Lateralwinkel, in Anlehnung an BACKES (1997)

Automobilbau, eingesetzt (HAVRILLA ET AL. 2011). Verglichen mit dem Widerstandspunktschweißen kann die Prozessgeschwindigkeit je nach Anwendung um den Faktor 3 bis 10 gesteigert werden (HANGST 2007; BERGMANN 2009a). Die Strahlnutzungszeit von 30 bis 40 % beim Laserstrahlschweißen mit kurzen Brennweiten kann auf bis zu 90 % erhöht werden (HAVRILLA ET AL. 2011). Industrielle Anwendungen an Beispielen aus dem Automobilbau sind die Fertigung von Türen (BAUR 2009), von Getriebeteilen (ELSNER 2008) und von Karosserieteilen (BECKER ET AL. 2008) sowie die Fertigung einer Pilotserie für eine Hutablage (HAMMER & BROCKMANN 2006).

### 2.1.2.3 Remote-Laserstrahl-Wobbelschweißen

Mit Laserstrahlquellen der neusten Generation und darauf ausgelegte Optiken können Fokusbereich von unter 50  $\mu\text{m}$  im Kilowatt-Bereich erzeugt werden, bei Arbeitsabständen von einem halben Meter (STILES 2009). Damit ist es möglich, sehr filigrane Schweißnähte mit einem hohen Aspektverhältnis wie beim Elektronenstrahlschweißen zu erzeugen. Bei den bisher beschriebenen Schweißanwendungen ist eine schmale Schweißnaht (siehe Abbildung 2.6 links) allerdings ein wesentlicher Nachteil, da die Festigkeit einer Schweißverbindung über ihren Anbindungsquerschnitt definiert wird.

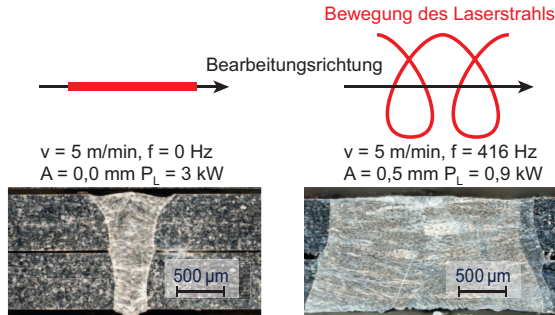


Abbildung 2.6: Darstellung des Remote-Laserstrahl-Wobbelschweißens, in Anlehnung an SCHWEIER ET AL. (2011)

Eine Möglichkeit, den Anbindungsquerschnitt zu verbreitern, besteht darin, den Laserstrahl um wenige Zehntel Millimeter oszillieren zu lassen (KRAETZSCH ET AL. 2011) (siehe Abbildung 2.6 rechts), wie dies beim Elektronenstrahlschweißen Stand der Technik ist (YAZOVSKIKH ET AL. 1995). Der Laserstrahl wird dabei entlang der Schweißnahtkontur auf einer sinus- oder einer kreisförmigen Bahn sowie auf einer stehenden oder einer liegenden Acht geführt. Optimale Geometrien mit ihrer Amplitude und Frequenz sowie mögliche Vorschubgeschwindigkeiten beim sogenannten Remote-Laserstrahl-Wobbelschweißen (RLWW) werden derzeit erforscht (KRAETZSCH ET AL. 2011). Um die nötigen Frequenzen von mehreren tausend Herz zu erreichen, ist der Einsatz von Scanneroptiken obligatorisch. Die meisten Scannerhersteller bieten dazu in ihren Steuerungen die Möglichkeit an, vorgegebenen Bahnen eine oszillierende Bewegung zu überlagern (ARGES GMBH 2011). Die überlagerte Oszillation erlaubt somit die Realisierung von Schweißnähten mit einem kleinen Fokussdurchmesser und mit Standard-Strahlpositioniertechniken, welche gängigen Festigkeitsanforderungen genügen (siehe Abbildung 2.6 rechts).

Mit dem RLWW besteht auch die Möglichkeit, schwerschweißbare Materialien, welche die Laserstrahlung sehr stark reflektieren, wie z. B. Kupfer, zu schweißen (STANDFUSS ET AL. 2010). Des Weiteren sind Verbindungen zwischen zwei unterschiedlichen Metallen möglich, wie z.B. Aluminium und Kupfer (KRAETZSCH ET AL. 2011).

### 2.1.3 Das Laserstrahlschneiden

Das größte Einsatzgebiet des Lasers in der industriellen Produktion ist gegenwärtig das Schneiden (OLSEN 2011). Vorteile gegenüber anderen Trennverfahren bestehen darin, dass der Laserstrahl ein sehr flexibles und zudem ein verschleißfreies Werkzeug mit einer hoher Produktivität ist. Gerade beim Wechsel von Werkstückreihen wird dies deutlich, da sich die Information zur Herstellung der gewünschten Schnitt-Kontur nicht im Werkzeug befindet, wie beim Stanzen, sondern in der steuerungstechnischen Umsetzung bzw. der Bahnausführung (HÜGEL & GRAF 2009).

Das Trennen ist eine weitere Hauptgruppe der Fertigungsverfahren gemäß der DIN 8580 (2003). Innerhalb des Trennens ist das Laserstrahlschneiden der Untergruppe thermisches Abtragen durch Strahl zugeordnet (DIN 8590 2003; DIN 2310-6 2003).

Das Laserstrahlschneiden kann wie das Schweißen in zwei Kategorien eingeteilt werden, in das kurzbrennweitige Laserstrahlschneiden und das Remote-Laserstrahlschneiden. Beim Remote-Laserstrahlschneiden wird zusätzlich zwischen dem Remote-Laserstrahl-Abtragsschneiden, bei dem eine mehrfache Belichtung der Schnittkante erfolgt, und dem Remote-Laserstrahl-Schmelzdruckschneiden mit einfacher Belichtung der Schnittkante, unterschieden (OLSEN 2011).

#### 2.1.3.1 Laserstrahlschneiden mit kurzen Brennweiten

Beim kurzbrennweitigen Laserstrahlschneiden wird der Laserstrahl von einer Optik bei einem Düsenabstand zwischen 0,5 und 1 mm auf das Werkstück fokussiert (POPRAWA 2005; SCHNEIDER ET AL. 2009). Das Material wird dabei lokal aufgeschmolzen und Schneidgas treibt das flüssige Material aus der Schnittfuge (HÜGEL & GRAF 2009).

Im Gegensatz zum Laserstrahlschweißen ist die Bearbeitungsgeschwindigkeit beim Laserstrahlschneiden derzeit nicht durch den Prozess, sondern durch die Dynamik der Handhabungskinematiken beschränkt. Da die Optik sehr nah über die Schnittkante geführt wird und dabei entweder die Masse von einer Portalanlage oder einem Industrieroboter in Bewegung ist, sind den möglichen Schnittgeschwindigkeiten enge Grenzen gesetzt. In SCHNEIDER ET AL. (2009) werden maximale Schnittgeschwindigkeiten von 750 mm/s angegeben bei 0,85 mm Blechdicke und



in HÜGEL & GRAF (2009) werden Schnittgeschwindigkeiten nur bis ca. 300 mm/s beschrieben. In BARTELS ET AL. (2008) wird beim Laserstrahlschneiden mit kurzen Brennweiten von einer durchschnittlichen Schnittgeschwindigkeit bei komplexen Konturen von ca. 400 mm/s gesprochen, die durch die Massenträgheit der Hauptachsen beschränkt ist. Aufgrund dieser Grenzen der Bearbeitungsgeschwindigkeit werden neue Remote-Laserstrahlschneidprozesse untersucht, um die Produktivität zu erhöhen.

Das kurzbrennweitige Laserstrahlschneiden wird in den unterschiedlichsten industriellen Anwendungen verwendet. GRIEBEL (2010) setzt dieses Verfahren z.B. für das Schneiden von B-Säulen im Automobilbereich ein. Im Pipelinebau ist das Verfahren ebenfalls weit verbreitet (VÄNSKÄ ET AL. 2011), um die Rohre auf das Verschweißen vorzubereiten. Ein Überblick über Anwendungsgebiete des Laserstrahlschneidens ist in POPRAWA (2005) gegeben.

### 2.1.3.2 Remote-Laserstrahl-Schmelzdruckschneiden

Das Remote-Laserstrahl-Schmelzdruckschneiden (RFC) wurde das erste Mal im SCHUTZRECHT DE10 2008 047 761 A1 von der Trumpf Laser GmbH beschrieben und patentiert. Das RFC ist eng mit dem Laserstrahl-Tiefschweißen verwandt. Durch eine Parametervariation, vor allem durch eine Erhöhung der Streckenenergie, bildet sich an der Keyhole-Frontwand eine abwärtsgerichtete Schmelzbadbewegung aus. Damit wird kein Material mehr um das Keyhole herum transportiert und es kommt zu keiner Ausprägung einer Schweißnaht. Es verbleibt im Gegenteil eine Schnittfuge. Die Prozessparameter variieren in Bezug auf das Material, die Blechdicken und die zur Verfügung stehende Laserstrahlquelle. Der verwendete Fokusbereich liegt meist zwischen 200 und 800 µm und es werden Vorschubgeschwindigkeiten bis 150 mm/s gefahren (ZÄH ET AL. 2010b). Bei den zulässigen Einstrahlwinkel ist allerdings auf Anforderungen für die Schnittkante zu achten, sofern ein bestimmter Schnittflankenwinkel entlang der Bearbeitungskontur gefordert ist (BACKES 1997).

### 2.1.3.3 Remote-Laserstrahl-Abtragsschneiden

Ein weiteres sehr junges Trennverfahren, das RAC, bietet die Möglichkeit Metallfolien mit bis zu 14 000 mm/s zu zerschneiden (LÜTKE 2011). Bei diesem Prozess wird das Material lokal aufgeschmolzen und partiell verdampft. Durch den erzeugten Dampfdruck wird die Schmelze aus der Schnittfuge ausgetrieben (siehe Abbildung 2.7). Charakteristisch bei diesem Prozess ist, dass das Material in die Richtung ausgetrieben wird, aus welcher der Laserstrahl auf das Werkstück trifft. Damit bildet sich auch der Schnittgrat in dieser Richtung aus. Zur Realisierung des RAC sind Laserstrahlintensitäten größer  $10^8 \text{ W/cm}^2$  erforderlich. Dies entspricht einem Fokussdurchmesser zwischen 30 und 80  $\mu\text{m}$  bei einer Laserleistung von 1 bis 5 kW.

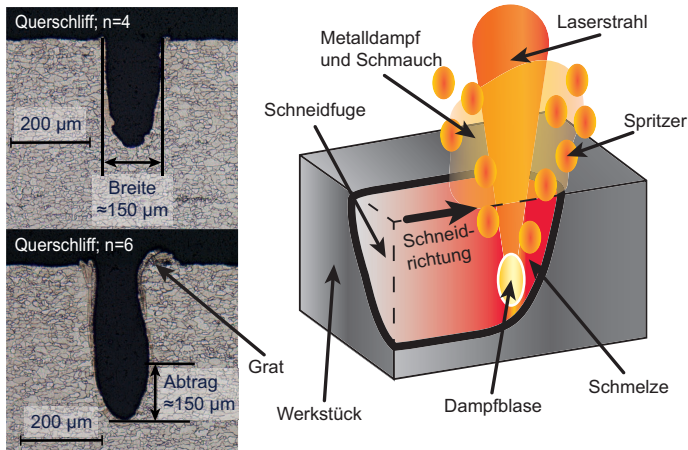


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des Abtragsprozesses (rechts); Schliffbilder bei 4 und bei 6 Belichtungen (links)

Um den Prozess aufrecht zu erhalten, wird der Laserstrahl mit Geschwindigkeiten  $v_{\text{Prozess}}$  zwischen 4000 und 14 000 mm/s über die Schnittfuge geführt (LÜTKE 2011; MUSIOL ET AL. 2012). Bei den angegebenen Prozessparametern können allerdings nur 30 bis 100  $\mu\text{m}$  Abtrag pro Belichtung der Schnittfuge realisiert werden. Sind Werkstücke dicker als 50  $\mu\text{m}$ , ist ein mehrfaches Belichten nötig (siehe Abbildung 2.7 links). Dieses schichtweise Abtragen des Materials führt, im Gegensatz zu den anderen Laserstrahlschneidprozessen, zu einer direkten Abhängigkeit der resultie-

renden Schnittgeschwindigkeit  $v_{Schnitt}$  von der Dicke des Werkstücks und damit von der Anzahl der Belichtungen  $n$  (siehe Gleichung (2.2)).

$$v_{Schnitt} = \frac{v_{Prozess}}{n} \quad (2.2)$$

Eine exemplarische Übersicht über den Verlauf der resultierenden effektiven Schnittgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Materialdicken ist in Abbildung 2.8 gegeben. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass bis zu einer Blechdicke von ca. 1 mm die Bearbeitungszeit erheblich reduziert werden kann.

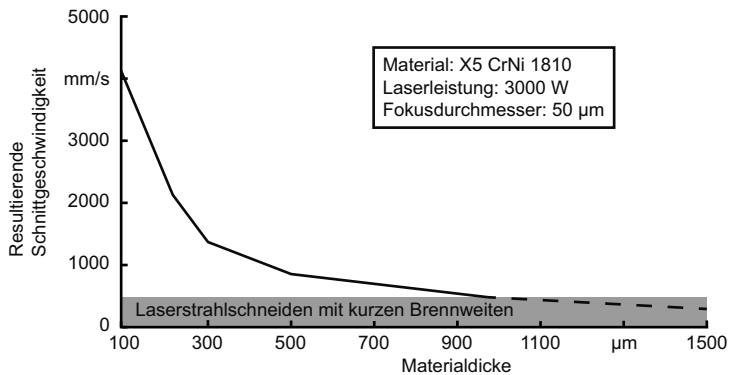


Abbildung 2.8: RAC, Vergleich der effektiven Schnittgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Blechdicken, in Anlehnung an ZÄH ET AL. (2009)

Durch den konzentrierten Energieeintrag und die kurzen Strahl-Stoff-Wechselwirkungszeiten erzeugt dieser Prozess eine sehr geringe thermische Einflusszone und damit sind sehr hochwertige und schmale Schnittkanten von ca. 150 µm Breite realisierbar. Die erreichbare Qualität bei verschiedenen Werkstoffen wird in PIHLAVA ET AL. (2010) anhand von Oberflächenrauheit, Gratbildung und Schnittfugenbreite gezeigt.

Eine Reduktion der thermischen Belastung kann durch Pausen zwischen jeder Belichtung von min. 100 ms erreicht werden. Um die Taktzeit für das gesamte Werkstück nicht zu verlängern, kann währenddessen eine weitere Schnittfuge belichtet werden (ZÄH ET AL. 2009).

Aufgrund der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten und der mehrfachen

Belichtung der Schnittkante bei einem kleinen Fokusbereich kann das RAC nur mit dem Einsatz von Scanneroptiken durchgeführt werden (MUSIOL ET AL. 2012). Untersuchungen zu den möglichen Einstrahlwinkeln wie beim RLW wurden bisher nicht durchgeführt. Da die Scanneroptiken bei den Versuchsaufbauten in den bisher erschienenen Veröffentlichungen parallel zum Werkstück ausgerichtet sind, wird davon ausgegangen, dass das RAC bei Einstrahlwinkeln von  $|\gamma|, |\beta| < 20^\circ$  realisierbar ist. Dies entspricht in etwa den möglichen Auslenkwinkeln der Spiegel von Scanneroptiken. Allerdings sind dadurch keine senkrechten Schnittkanten zu fertigen, sondern sie zeigen, aus Strahlrichtung gesehen, immer leicht nach außen.

Für ein besseres Prozessverständnis wird in MUSIOL ET AL. (2011) ein Modellierungsansatz vorgestellt, mit dessen Hilfe Aussagen über die benötigten Belichtungen und über optimale Prozessparameter getroffen werden können. Ein tiefergehendes Prozessverständnis ist bei diesem jungen Verfahren noch nötig, um das RAC in der industriellen Produktion zu etablieren. Mögliche Anwendungsfelder für das RAC sind das Ausschneiden von Dichtungsgeometrien aus dem Automobilbereich (Zylinderkopfdichtungen, Abgasanlagendichtungen), Federelementen, Wärmetauschern, Brennstoffzellen oder Elektroden für Lithium-Ionen-Zellen (LÜTKE 2011; MUSIOL ET AL. 2012).

### 2.2 Laserstrahlquelle und -führung

Das RAC stellt sehr hohe Anforderungen an die Laserstrahlquelle im Vergleich zum RLW oder RFC. Um die benötigten Strahlintensitäten von mehr als  $10^8 \text{ W/cm}^2$  bei einem Fokusbereich von  $50 \mu\text{m}$  auf dem Werkstück zu erreichen mit einem Arbeitsabstand von einem halben Meter, können bis jetzt ausschließlich Grundmode-Faserlaserstrahlquellen verwendet werden (THIEME 2008; PIHLAVA ET AL. 2010). Solche Laserstrahlquellen emittieren hochbrillante Laserstrahlen, die ein kleines Strahlparameterprodukt (*SPP*), welches die Qualität der Laserstrahlung beschreibt, von ca.  $0,3 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  besitzen. Mit Grundmode-Faserlaserstrahlquellen können auch qualitativ hochwertige Schweißnähte erzeugt werden (GRIEBEL 2010; SCHWEIER ET AL. 2011). Daher wird im Folgenden nur auf diese spezielle Laserstrahlquelle mit ihren relevanten Eigenschaften für die robotergeführte Laserstrahlbearbeitung eingegangen. Für einen allgemeinen Überblick über Laserstrahlquellen und Informatio-

nen zur Erzeugung der Strahlung wird an dieser Stelle auf Grundlagenbücher wie z. B. GRAF (2009), HERING & MARTIN (2006), POPRAWE (2005) und STEEN & MAZUMDER (2010) verwiesen.

Der erste Faserlaser wurde von SNITZER (1963) beschrieben. Diese Art der Laserstrahlquelle wird derzeit schnell weiterentwickelt. Standen im Jahr 2000 nur Faserlaser mit einer Leistung von 100 W zur Verfügung (GRUPP 2006), konnte deren Leistung bis 2009 auf 50 kW bei einem *SPP* von kleiner 4,5 mm-mrad und 10 kW bei Grundmode-Faserlasern gesteigert werden (STILES 2009). Faserlaser sind Festkörperlaser, bei denen eine optische Faser mit laseraktiven Ionen dotiert wurde, die über einen Diodenlaser angeregt werden. Die erzeugte Laserstrahlung kann im Anschluss in einer passiven optischen Faser (Lichtleitfaser ohne laseraktive Ionen) bis zur laserstrahlformenden Optik am Roboterflansch geführt werden, siehe Abbildung 2.1. Diese flexible Führung der Laserstrahlung, welche auf der Totalreflexion innerhalb der Lichtleitfaser beruht, ist ein entscheidender Vorteil bei der robotergeführten Laserstrahlbearbeitung gegenüber Laserstrahlquellen, wie dem CO<sub>2</sub>-Laser, dessen Strahlung über aufwändige Spiegelsysteme geführt werden muss (RIPPL 2006). Die Laserstrahlung tritt am Ende der Faser in die Optik ein und wird dort für die Materialbearbeitung fokussiert. Die Gestalt des Laserstrahls vom Ende der Faser über eine Fokussierlinse bis nach dem kleinsten Laserstrahldurchmesser ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Grundmode-Laserstrahlen sind radialsymmetrisch und weisen somit in  $x$ - und  $y$ -Richtung die gleichen Eigenschaften auf, zudem haben sie eine nahezu ideale Gauß'sche Intensitätsverteilung (HÜGEL & GRAF 2009).

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben ist, wird für die Remote-Laserstrahlbearbeitung eine möglichst große Fokusslänge  $z_f$  für einen großen Arbeitsabstand benötigt, während der Fokussdurchmesser  $d_f$  möglichst klein sein sollte. Dazu erleichtert eine große Rayleigh-Länge  $z_R$  die Relativbewegung zwischen der Optik und dem Werkstück. Im Abstand der Rayleigh-Länge vom Fokuspunkt  $z \in [\pm z_R]$  verdoppelt sich der Querschnitt des Laserstrahls. Die Tiefenschärfe des Laserstrahls ist demnach  $2z_R$ . Innerhalb dieses Bereichs vermindert sich die Prozessqualität beim Laserstrahlschweißen und -schneiden nur geringfügig und ist vernachlässigbar (HÜGEL & GRAF 2009). Die folgende Herleitung der Parameter von Laserstrahlen, welche für die Bahnplanung relevant sind, ist in Anlehnung an HERING & MARTIN (2006) und HÜGEL & GRAF (2009) entstanden.

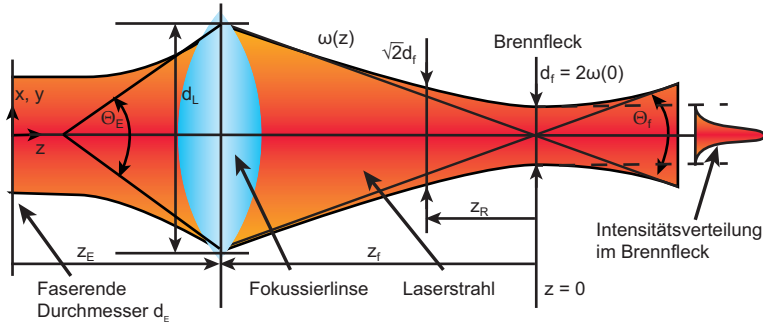


Abbildung 2.9: Idealisierte Darstellung der Ausbreitung des Laserstrahls vom Ende der Faser bis nach dem Brennfleck, in Anlehnung an HÜGEL & GRAF (2009)

Damit sich ein Laserstrahl für die Remote-Laserstrahlbearbeitung eignet, sollte sein Divergenzwinkel  $\Theta_f$ , wie er in Abbildung 2.9 dargestellt ist, klein sein. Das bedeutet nach Gleichung (2.3), dass der Laserstrahl eine hohe Qualität und damit ein kleines  $SPP$  besitzen muss. Wird ein Laserstrahl durch ein ideales optisches Element geführt oder an einem idealen Spiegel reflektiert, ändern sich diese Eigenschaften nicht.

$$SPP = \frac{d_f \Theta_f}{4} = \frac{d_E \Theta_E}{4} = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \quad (2.3)$$

Die Beugungsmaßzahl  $M^2$  ist neben dem  $SPP$  (Gleichung (2.3)) ein charakteristischer Wert für die Qualität einer Laserstrahlquelle und muss experimentell ermittelt werden (DIN 11146 2005), wobei die Wellenlänge  $\lambda$  durch das laseraktive Medium festgelegt ist. Bei einem idealen Laserstrahl ist das  $SPP = \lambda/\pi$  und damit  $M^2 = 1$ . Bei realen Laserstrahlen ist allerdings  $M^2$  immer größer als 1.

Der kleinstmögliche Fokusbereich  $d_f$  ist nach Gleichung (2.4) nur von den Eigenschaften der Laserstrahlung, wie dem Divergenzwinkel  $\Theta_f$ , der Wellenlänge  $\lambda$  und der Beugungsmaßzahl  $M^2$  abhängig.

$$d_f = 4M^2 \frac{\lambda}{\pi} \frac{1}{\Theta_f} \quad (2.4)$$

Der Divergenzwinkel  $\Theta_f$  des fokussierten Laserstrahls kann über eine geometrische Überlegung in Abbildung 2.9 und unter der Annahme, dass bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  $d_L \ll z_f$  gilt, in einen direkten Zusammenhang mit der Fokusslänge und dem Durchmesser des bestrahlten Teils der Fokussierlinse gebracht werden (Gleichung (2.5)).

$$\Theta_f = \arctan\left(\frac{d_L}{z_f}\right) \approx \frac{d_L}{z_f} \quad (2.5)$$

Aus den Gleichungen (2.4) und (2.5) folgt, dass der fokussierte Laserstrahl auf dem Werkstück, neben den Eigenschaften der Laserstrahlquelle, auch von der Anordnung der optischen Elemente abhängig ist (Gleichung (2.6)).

$$d_f \approx 4M^2 \frac{\lambda}{\pi} \frac{z_f}{d_L} \quad (2.6)$$

Ein großer Strahldurchmesser beim Passieren der Fokussierlinse  $d_L$  wird bei einem Laserstrahl mit einer hohen Strahlqualität nur durch einen großen Abstand zwischen dem Faserende und der Fokussierlinse  $z_E$  erreicht.

Neben einem kleinen Fokussdurchmesser und damit einer hohen Strahlintensität ist bei der Laserstrahlbearbeitung eine möglichst große Rayleigh-Länge  $z_R$  von Interesse.

$$z_R = \frac{1}{4M^2} \frac{\pi}{\lambda} d_f^2 \quad (2.7)$$

Gleichung (2.7) offenbart allerdings ein Dilemma, da  $z_R$  möglichst groß sein soll und  $d_f$  klein, aber  $z_R$  proportional zu  $d_f^2$  gilt. Eine hohe Qualität des Laserstrahls verbessert aber dieses Verhältnis.

Die vorgestellten Beziehungen der Laserstrahlparameter zueinander zeigen, dass beim Design der laserstrahlformenden Optiken Kompromisse eingegangen werden müssen. Das Hauptaugenmerk bei diesem Design ist auf den Durchmesser des Laserstrahls im Fokus zu legen, da durch ihn die jeweiligen Laserstrahlprozesse, wie z. B. das RAC oder das RLW, ermöglicht werden. Die weiteren Parameter, wie die Fokus- und die Rayleigh-Länge, ergeben sich in Kombination mit dem SPP und dem Durchmesser der Lichtleitfaser.

### 2.3 Vergleich der Laserstrahlprozesse

In diesem Abschnitt werden Vergleiche der beschriebenen Laserstrahlprozesse aufgezeigt und Prozesse mit den gleichen Anforderungen an die Hardware zusammengefasst. Anschließend werden die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade der Prozessgruppen beschrieben. Zudem sind in Tabelle 2.1 die charakteristischen Prozessparameter übersichtlich dargestellt, welche für eine Bahnplanung die Eingangsdaten darstellen.

Prozess \	Bearbeitungs- geschwindigkeit* [mm/s]	Fokusburch- messer [μm]	Arbeitsabstand [mm]	Anzahl Belichtungen [-]
LW	100 - 300	300 - 800	1 - 249	1
RLW	100 - 300	300 - 800	250 - 3000	1
RLWW	1000 - 14000**	50 - 200	100 - 600	1
LC	100 - 300	100 - 800	1	1
RFC	50 - 150	200 - 800	250 - 3000	1
RAC	4000 - 14000	< 100	100 - 600	≥ 1

*Tabelle 2.1: Übersicht über wesentliche Prozessparameter beim  
Laserstrahlschweißen und -schneiden,  
\* Richtwerte, \*\* Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls*

Die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist bei der Bahnplanung der Hauptparameter, da sie die nötige Systemtechnik festlegt. Das RAC und das RLWW benötigen eine Scanneroptik, um den Fokus des Laserstrahls mit den hohen prozessbedingten Geschwindigkeiten über das Werkstück zu führen. Die anderen Prozesse (RLW, RFC) können auch mit einer Fest- oder Zoomoptik durchgeführt werden, welche von einem Industrieroboter bewegt wird (MUNZERT 2010). Kurzbrennweitige Optiken werden ebenfalls häufig mit Industrierobotern bewegt (SCHNEIDER ET AL. 2009). Neben der Geschwindigkeit bestimmen der Fokusburchmesser und die Bearbeitungsaufgabe die erforderliche Genauigkeit der Laserstrahlpositionierung. Zusätzlich stellt die mehrfache Belichtung ein und derselben Schnittkontur beim RAC eine weitere Herausforderung dar, da eine sehr präzise Ablenkung des Laserstrahls bei Geschwindigkeiten mit mehr als 4000 mm/s benötigt wird. Ausgehend von den Eigenschaften der Prozesse werden diese in drei Gruppen eingeteilt (vgl. auch die Laserstrahlpositionierungskonzepte aus Abbildung 2.2). Das kurzbrennweitige Schweißen



und Schneiden (LW, LC) wird der ersten Gruppe zugeordnet. Das RLW und das RFC bildet die zweite Gruppe und die beiden Prozesse, die eine Scanneroptik benötigen, (RLWW, RAC) die Dritte.

Anforderungen der Prozessgruppen an die Strahlpositionierung werden im Folgenden beschrieben, da beim Schweißen oder Schneiden eine exakte Positionierung des Laserstrahls mit allen sechs Freiheitsgraden auf dem Werkstück nicht nötig ist. Dabei wird zwischen Freiheitsgraden bei der Orientierung (rotatorische Freiheitsgrade) und der Positionierung (translatorische Freiheitsgrade) des Laserstrahls in Bezug auf ein Koordinatensystem, welches in den Fokuspunkt des Laserstrahls gelegt wurde (siehe Abbildung 2.10), unterschieden.

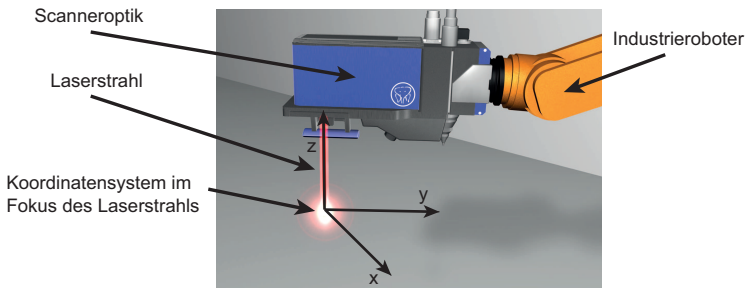


Abbildung 2.10: Beschreibung der Aufgabenredundanz bei der Laserstrahlbearbeitung

Da der Laserstrahl radialsymmetrisch ist (vgl. Abbildung 2.9), kann sich der Roboter um die z-Achse des TCP-Koordinatensystems drehen, ohne Änderungen am Prozess zu verursachen (siehe Abbildung 2.10). Die Strahlorientierung ist damit ein rotatorischer Freiheitsgrad. Die variablen Einstrahlwinkel, Drehungen um die x- und die y-Achse, stellen weitere Freiheitsgrade dar. Bei der Laserstrahlbearbeitung mit kurzen Brennweiten sind diese Freiheitsgrade nur in sehr geringem Maße nutzbar, da sich der Fokusbereich aufgrund einer kleinen Rayleigh-Länge schnell vergrößert. Die Remote-Laserstrahlbearbeitung bietet hier mehr Möglichkeiten, die Einstrahlwinkel zu variieren. Das führt dazu, dass innerhalb der gültigen Einstrahlwinkel keine Anforderungen an die Orientierung gestellt sind.

Die große Rayleigh-Länge, bedingt durch die großen Fokusbereiche beim RLW und RFC, bietet zudem eine Toleranz entlang der z-Achse,

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

womit die einzige Anforderung dieser Prozesse eine exakte Positionierung in x- und y-Richtung ist. Beim Schweißen eines Überlappstoßes (vgl. Abbildung 2.4) kann je nach Größe der Überlappung sogar diese Positionierung um einige Millimeter variieren. Beim RAC hingegen ist eine genauere Positionierung nötig, bedingt durch die kurze Rayleigh-Länge, die kleinen Fokussdurchmesser und die wiederholte Belichtung der Schnittkante. Diese Eigenschaften der Laserstrahlprozesse sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Prozess \ Freiheitsgrade	Translatorische Freiheitsgrade	Rotatorische Freiheitsgrade	Anforderung Prozess [FHG]	Anforderung Genauigkeit
LW, LC	Kleine Tiefenschärfe	Stark begrenzte Einstrahlwinkel, Strahlorientierung	5	Mittel
RLW, RFC	Große Tiefenschärfe	Einstrahlwinkel, Strahlorientierung	2 + 3 mit Einschränkungen	Hoch
RAC, RLWW	Kleine Tiefenschärfe	Einstrahlwinkel, Strahlorientierung	3 + 2 mit Einschränkungen	Sehr hoch

*Tabelle 2.2: Übersicht über Freiheitsgrade, welche die Laserstrahlprozesse bieten sowie Vergleich der benötigten Genauigkeiten der Prozesse*

Als Fazit lässt sich festhalten, dass das RAC die höchsten Anforderungen der Laserstrahlprozesse an die Systemtechnik stellt, aber auch ein sehr hohes Potenzial aufweist, die Fertigungszeiten erheblich zu reduzieren. Ist eine Laseranlage nach Abbildung 2.1 für das RAC ausgelegt, kann damit auch das RLWW realisiert werden, ohne dass Hardware getauscht werden muss. Das gleiche gilt auch für eine Kombination der Prozesse RLW und RFC.

### 2.4 Flexible Fertigungszellen mit mehreren Prozessen

Die Kombination von mehreren Laserstrahlprozessen in einer Fertigungszelle ist derzeit ein zentrales Forschungsthema. Sofern die Prozessparameter nach Tabelle 2.1 von mehreren Prozessen übereinstimmen, können beide mit der selben Systemtechnik durchgeführt werden, wie die folgenden wissenschaftlichen Arbeiten aufgezeigt haben.

In ULRICH (2006) werden unterschiedliche Laserstrahlprozesse auf ihre Eignung einer Kombination hin untersucht. Für die Prozesskette Laserstrahlreinigen, dem nachfolgendem Auftrag von Klebstoffen und dem abschließenden Aushärten der Klebstoffverbindung mittels Laserstrahlung wurde ein Kombinationswerkzeug konstruiert. Allerdings unterscheidet ULRICH (2006) zwischen einem Primär- und einem Sekundärprozess, wobei das Werkzeug auf den Primärprozess ausgelegt wird und es dadurch beim Sekundärprozess zu noch akzeptablen Qualitätseinbußen kommen kann.

VÄNSKÄ ET AL. (2011) beschreibt eine Laseranwendung bei der durch einen Wechsel des Bearbeitungskopfes das Orbital-Schweißen und Schneiden flexibler gestaltet wird. Die aufgeführten unproduktiven Zeiten, die beim Wechsel des Bearbeitungskopfes entstehen, sind durch Schnellkopplungssysteme und flexible Möglichkeiten, den Laserstrahl bis zur Optik zu führen, gekennzeichnet. Beide Bearbeitungsköpfe sind auf ihre jeweilige Anwendung hin optimiert.

Einen anderen Weg geht PETRING ET AL. (2005) mit der Entwicklung einer laserstrahlformenden Optik, mit der sowohl das Schweißen als auch das Schneiden durchgeführt werden kann (SCHNEIDER ET AL. 2005, 2009). Die Nebenzeiten sinken dabei signifikant, da ein Wechsel der Optik nicht mehr nötig ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Lichtleitfaser der Laserstrahlquelle nicht aus der Optik entfernt werden muss. Dadurch können keine Verunreinigungen in das empfindliche System eindringen. Ein Nachteil bei diesem Ansatz ist, dass Kompromisse bei der Anwendung beider Prozesse eingegangen wurden.

Die beschriebenen Kombinationssysteme betreffen ausschließlich die kurzbrennweitige Laserstrahlbearbeitung. Der Einsatz einer Scanneroptik in der Remote-Laserstrahlbearbeitung wurde bisher nur mit jeweils einem Prozess gezeigt. Eine kombinierte Bearbeitung mit dem RLW und RAC wurde zuerst von ZÄH ET AL. (2008) als Ausblick für das Forschungsprojekt RoboLaSS<sup>3</sup> – Roboter geführter Laser zum Schweißen und Schneiden – vorgestellt. Ergebnisse zu dieser Kombinationsbearbeitung wurden z. B. anhand der Fertigung eines Wärmetauschers präsentiert (MUSIOL ET AL. 2012). Bei diesen Arbeiten sind das Schweißen und

---

<sup>3</sup>Das Forschungsprojekt RoboLaSS wurde vom BMBF im Rahmen der Förderinitiative MaBriLas – Materialbearbeitung mit brillanten Laserstrahlquellen – gefördert.

das Schneiden Hauptprozesse, welche ohne Qualitätseinbußen verwendet werden können.

Die Kombination von verschiedenen Laserstrahlprozessen kann daher als ein Trend in der Laserstrahlbearbeitung angesehen werden. Neben Prototypenanlagen im wissenschaftlichen Umfeld werden solche flexiblen Fertigungszellen auch in der Industrie gewünscht, um die gezeigten Vorteile bei der Produktivität nutzen zu können (BAUR 2009).

### 2.5 Lasersicherheit

Im Vergleich zur Intensität der Sonnenstrahlung (durchschnittlich  $0,1353 \text{ W/cm}^2$  (HERING & MARTIN 2006)) ist die benötigte Intensität der Laserstrahlung für das RAC mit  $10^8 \text{ W/cm}^2$  bedeutend größer. Deshalb ist es nötig, Menschen vor der Laserstrahlung zu schützen (DIN 11553-1 2009). Dies wird erreicht, indem die Laserstrahlfertigungszelle mit Schutzwänden (siehe Abbildung 2.1) umgeben wird, die verhindern, dass der Laserstrahl in der Produktionshalle oder bei Personen Schäden verursacht. Es gibt passive Schutzwände aus Stahlbeton, die eine permanente manuelle Überwachung des Fertigung erfordern, damit der Laserstrahl innerhalb der Standzeit der Schutzwand vom Anlagenbediener ausgeschaltet werden kann. Gerade bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung wird die Gefahr durch die langen Brennweiten und die daraus resultierende lange Rayleigh-Länge erhöht, da die Standzeiten der Schutzwände im Fokus des Laserstrahls nur wenige Sekunden betragen (BRAUNREUTHER ET AL. 2009). Mit dem Einsatz von aktiven Überwachungssystemen kann eine vollautomatische Produktion ohne manuelle Überwachung verwirklicht werden. Aktive Laserschutzwände erkennen ein Auftreffen des Laserstrahls und schalten dann den Laserstrahl umgehend sicher ab (KROTH 2008). Ein anderer Ansatz wird von HEBERER (2009) präsentiert. Optische Sensoren überwachen bei diesem Sicherheitssystem die Arbeitsfläche. Sofern die Laserstrahlquelle das Einschalten der Emission dem Sicherheitssystem meldet, prüft dieses, ob der Laserstrahl auf der Arbeitsfläche auftritt. Sofern kein Brennfleck detektiert werden kann, wird der Laserstrahl abgeschaltet.

### 2.6 Systeme zur Laserstrahlfokussierung

Für den Einsatz der vorgestellten Prozesse muss der Laserstrahl auf dem Werkstück fokussiert werden. Dazu werden laserstrahlformende Optiken benötigt, die in drei Gruppen eingeteilt werden können: Kurzbrennweitige Optiken, Remote-Optiken und Scanneroptiken (siehe Abbildung 2.2 a-c). Kurzbrennweitige Optiken (a) eignen sich bei Fokuslängen bis zu 250 mm, mit ihnen können meist auch Prozess- oder Schutzgase an die Prozesszone geführt werden. Remote-Fest- oder Zoomoptiken (b) können Fokuslängen von mehreren Metern erzeugen, wobei Zoomoptiken die Fokuslänge aktiv einstellen können. Die Formung des Laserstrahls erfolgt bei den kurzbrennweitigen und den Remote-Optiken mit Linsenelementen. Für die Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück wird eine Handhabungskinematik benötigt.

Eine weitere Gruppe bilden die Scanneroptiken (vgl. Abbildung 2.2 c), welche zusätzlich zu Linsenelementen bewegte Spiegel besitzen, um den Laserstrahl selbstständig abzulenken (vgl. Abbildung 2.11). Auf die Scanneroptik wird in diesem Abschnitt näher eingegangen, da sie ein zentrales Element bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung darstellt, um die erforderlichen hohen Prozessgeschwindigkeiten zu erreichen. Weitere Informationen zu konventionellen Optiken sind z. B. in HÜGEL & GRAF (2009) zu finden.

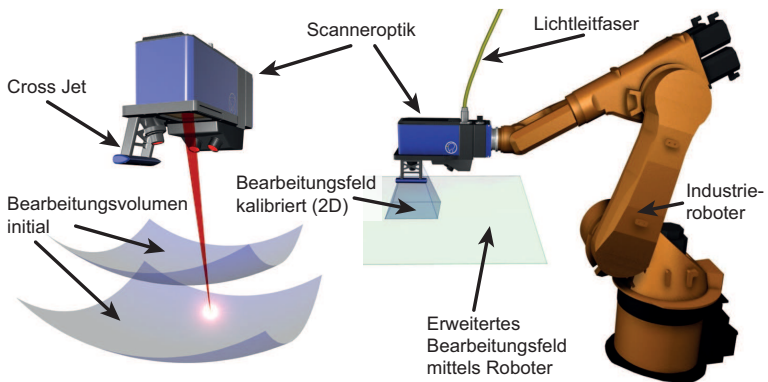


Abbildung 2.11: Bearbeitungsfeld einer Scanneroptik

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Die Spiegel einer Scanneroptik werden mit Hilfe von Galvanometerantrieben bewegt. Das Galvanometer wurde nach dem italienischem Arzt und Forscher Luigi Galvani (1737-1798) benannt (BERTELSMANN LEXIKON 1984) und dient in erster Linie als Messgerät für sehr kleine elektrische Ströme (SIEMENS & HALSKE AG 1964). Bei einem Spiegelgalvanometer wird ein Spiegel an einer Spule befestigt, welche sich im Magnetfeld eines Permanentmagneten befindet (siehe Abbildung 2.12). Wird eine Spannung an der Spule angelegt, richtet sich diese durch den Halleffekt im Magnetfeld aus und damit auch der Spiegel. Über einen Lichtstrahl, der aus einem großen Abstand auf den Spiegel gerichtet ist, können auch geringste Ströme auf einer Messskala angezeigt werden. Bei Galvanometerantrieben wird ebenfalls der Halleffekt genutzt. In diesem Fall wird eine definierte Spannung an der Spule angelegt und damit eine vorgegebene Auslenkung des Spiegels erreicht.

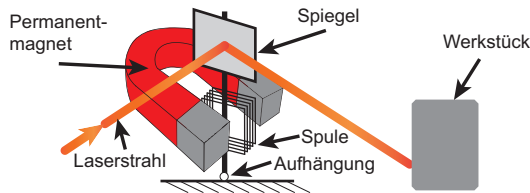


Abbildung 2.12: Funktionsweise der Galvanometerantriebe einer Scanneroptik durch den Halleffekt

Scanneroptiken werden in zwei Klassen eingeteilt, Pre-Objectiv- und Post-Objectiv-Scanner (ZÄH ET AL. 2010c). Der Unterschied zwischen den beiden Klassen liegt bei der Fokussachführung, sobald die Nullstellung der Spiegel und damit die Mitte des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik verlassen wird (siehe initiales Bearbeitungsfeld in Abbildung 2.11 und den Vergleich in Abbildung 2.13). Bei Pre-Objectiv-Scannern wird die Fokusslänge über mehrere Linsen, F-Theta-Objektiv genannt, ausgeglichen, die nach den Spiegeln angebracht sind (siehe Abbildung 2.13 links). Die Vorteile liegen bei diesem System darin, dass die Fokusslänge optisch angepasst wird und damit keine mechanischen Elemente nötig sind. Ein Nachteil resultiert aus der Erwärmung der Linsen durch den Laserstrahl und damit in einer thermisch bedingten Veränderung der Fokusslänge, dem Fokussshift. Zudem können solche Scanneroptiken nur bei der 2D-Bearbeitung eingesetzt werden und das Bearbeitungsfeld ist kleiner als das der Post-Objectiv-Scanner.

Bei Post-Objectiv-Scannern wird eine mechanisch angetriebene Linse verwendet, um den Strahlfokus in einer Ebene zu halten (siehe Abbildung 2.13 rechts). Dafür muss die Fokusbachführung einmalig kalibriert werden, das initiale und das kalibrierte Bearbeitungsfeld ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Diese Kalibrierung kann für verschiedene Bearbeitungsebenen durchgeführt werden, um eine 3D-Fähigkeit der Scanneroptik zu erreichen.

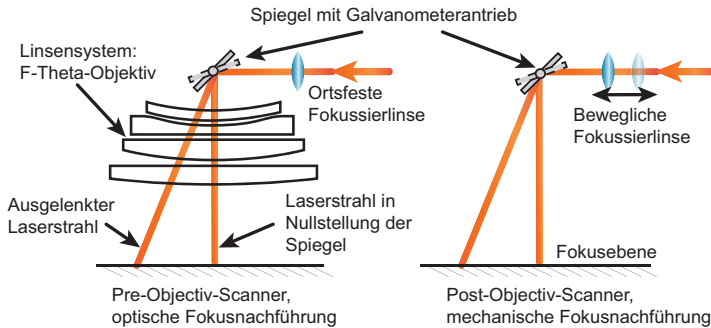


Abbildung 2.13: Darstellung von Systemen zum Nachführen der Fokusbachführung, in Anlehnung an ZÄH ET AL. (2010c)

Beide Systeme bieten demnach Vorteile, so dass die Systemtechnik für den jeweiligen Prozess spezifisch ausgewählt werden muss. Zum Schutz der Scanneroptik wird ein sogenannter Cross Jet verwendet, welcher mit Druckluft Spritzer und Prozessrauche fernhält (vgl. Abbildung 2.11). Die geforderten Prozessgeschwindigkeiten und Genauigkeiten der Laserstrahlpositionierung beim RAC und beim RLWW stellen hohe Anforderungen an die Bewegungen der Spiegel der Scanneroptik. In SCHWEIER ET AL. (2011) und ZÄH ET AL. (2010c) werden Methoden beschrieben, um das dynamische Verhalten von Scanneroptiken zu bewerten. Es hat sich gezeigt, dass beim RAC und beim RLWW selbst hochdynamische Scanneroptiken ihre Leistungsgrenzen erreichen und dadurch unerwartete Qualitätseinbußen am Werkstück auftreten können. Abweichungen von der gewünschten Bahn zeigen sich beispielsweise, wenn die programmierte Kontur zu enge Radien aufweist, so dass sie von der Scanneroptik nicht mehr bahngetreu abgefahren werden kann, da die Massenträgheit der Spiegel die maximale Beschleunigung begrenzt. Hier muss entweder die Geschwindigkeit reduziert oder die Bahnabweichung akzeptiert werden.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Sind bei einer Kontur Ecken enthalten, gibt es zwei Strategien, diese abzufahren (ARGES GMBH 2011; LÜTKE ET AL. 2009). Ist der Winkel zwischen den Anbindungen groß, kann der Laserstrahl auf einer leicht abgerundeten Bahn geführt werden (siehe Abbildung 2.14 a) und die Ecke wird überschleift. In diesem Fall muss aber sichergestellt sein, dass die Abweichung von der Sollkontur im Bereich der Fertigungstoleranzen des Werkstücks liegt. Die zweite Strategie besteht darin, den Laserstrahl an der Ecke auszuschalten, eine Zusatzbewegung durchzuführen und die Bearbeitung von neuem in der Zielrichtung zu beginnen (siehe Abbildung 2.14 b).

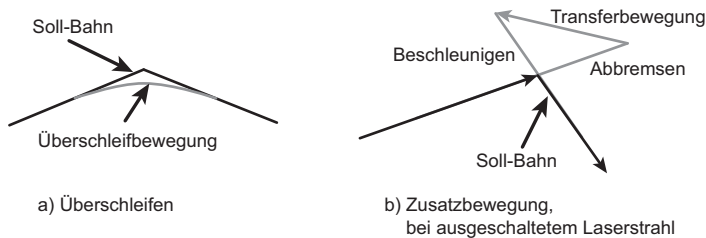


Abbildung 2.14: Fahrstrategien zur Bearbeitung von Ecken

Der Aufbau der Linsenelemente der Scanneroptiken ist für den Einsatz beim RAC und RLWW auf einen definierten und möglichst kleinen Fokaldurchmesser  $d_f$  ausgelegt, bei einer möglichst großen Fokallänge  $z_f$ . Dies erfordert aufgrund der geringen Divergenz  $\Theta_E$  der Grundmode-Laserstrahlung eine sehr lange Optik, um einen großen Abstand  $z_e$  zwischen dem Faserende und der Fokussierlinse zu erreichen. Ein großes  $z_e$  führt zu einem großen Durchmesser des Laserstrahls auf der Fokussierlinse  $d_L$  und nach Gleichung (2.6) zu einem kleinen Fokaldurchmesser. Durch Bauraumbegrenzungen haben daher gängige Scanneroptiken für das RAC Fokallängen von bis zu ca. 500 mm, was üblicherweise zu einer Bearbeitungsfeldgröße von ca.  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  führt. Da viele Werkstücke diese Abmaße überschreiten und durch Begrenzungen der Anstellwinkel des Laserstrahls nicht immer das gesamte Bearbeitungsfeld genutzt werden kann, werden die Scanneroptiken meist mit Handhabungskinematen, wie sie in Abbildung 2.2 dargestellt sind, über den Werkstücken positioniert.



## 2.7 Industrieroboter

Roboter werden nach der DIN 8373 (1996) als Manipulatoren mit mindestens drei frei programmierbaren Achsen definiert. Durch diese sehr freie Beschreibung sind eine Vielzahl an unterschiedlichen Bauformen entstanden, die anwendungsbezogen in zwei Klassen eingeteilt sind, die Industrieroboter und die Serviceroboter (INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2011a, b). Bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung wird auf Grund seines großen Arbeitsraums, seiner Genauigkeit und seiner einfachen Handhabung häufig eine spezielle Bauform von Industrierobotern, der Sechs-Achsen-Vertikal-Knickarm-Roboter, verwendet, um die laserstrahlformende Optik zu bewegen (BECKER ET AL. 2004; MEISSNER ET AL. 2009; STEMMANN 2006; VOGL & MUNZERT 2012). Im Vergleich zu hochgenauen und damit teuren Portalanlagen benötigt diese kostengünstige Kinematik nur einen verhältnismäßig kleinen Aufstellraum und kann daher ohne großen Aufwand in bestehende Fertigungs- oder Versuchsumgebungen integriert werden. Deshalb werden im Folgenden nur allgemeine Begriffe und Grundlagen von dieser Bauform (siehe Abbildung 2.15) sowie kinematisch redundante Systeme in Anlehnung an WEBER (2002) vorgestellt, welche für die scanneroptikbasierte Laserstrahlbearbeitung relevant sind. Informationen zu weiteren Bauformen von Industrierobotern, wie z. B. Horizontal-Knickarm-Roboter (SCARA-Roboter), Portalroboter und Parallelroboter, sowie deren mathematische Beschreibungen sind in Standardwerken der Robotik zu finden (WEBER 2002; CRAIG 2005).

### 2.7.1 Begriffe und Grundlagen

In Abbildung 2.15 ist ein Sechs-Achsen-Vertikal-Knickarm-Roboter dargestellt. Er besteht aus einer Verkettung von sechs Elementen, die über rotatorische Achsen miteinander verbunden sind. Die ersten drei Achsen (A1-A3) werden Hauptachsen genannt, daran anknüpfend kommen die Handachsen (A4-A6). Die Handachsen enden am Roboterflansch, an dem ein Werkzeug befestigt werden kann. Der Werkzeugarbeitspunkt wird als *Tool Center Point* (TCP) bezeichnet und ist bei der Laserstrahlbearbeitung in der Regel der Fokuspunkt des Laserstrahls. Sofern eine Scanneroptik an dem Roboter montiert ist, kann der TCP durch die Scanneroptik relativ zum Roboterflansch verschoben werden. Da die

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Achsen der Scanneroptik standardmäßig nicht von der Robotersteuerung angesteuert werden, sondern über eine eigene Steuerung verfügen (BECKER ET AL. 2004; VOGL & MUNZERT 2012) und damit die aktuelle Richtung des Laserstrahls in der Robotersteuerung nicht bekannt ist, wird beim Roboter die Fokusposition bei der Nullstellung beider Spiegel (vgl. Abbildung 2.13) als TCP kalibriert. Die Position des TCP im Arbeitsraum, bestehend aus drei geometrischen ( $[x \ y \ z]^T$ ) und drei rotatorischen (A, B, C) Freiheitsgraden, ist mit der Angabe der sechs Achswinkel ( $[\Phi_1, \dots, \Phi_6]^T$ ) vollständig beschrieben. Eine solche Stellung des Roboters heißt Pose. Bei einer robotergeführten Scanneroptik schließt die Pose die Stellung der Spiegel und der Fokussierlinse mit ein, wie sie von dessen Steuerung vorgegeben wird ( $[\Phi_1, \dots, \Phi_6, \Phi_{S1}, \Phi_{S2}, \Phi_{S3}]^T$ ).

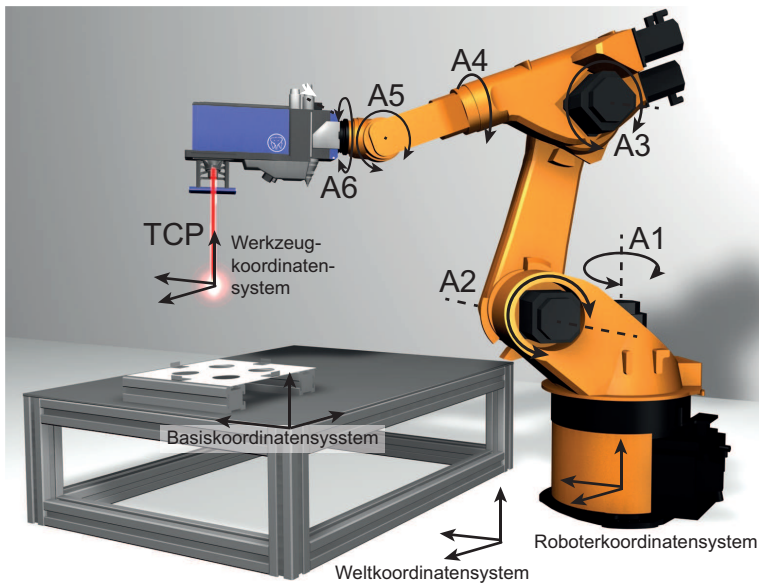


Abbildung 2.15: Koordinatensysteme und die sechs Achsen (A1-A6) eines Industrieroboters

Ausgehend von der Basis des Roboters kann bei Vorgabe der Drehwinkel  $\Phi_i$  aller Achsen die Position des Roboterflansches bestimmt werden und damit die Position des TCP. Diese Berechnung wird Vorwärtstransformation genannt und ist eine eindeutige Abbildung von Gelenkkoordi-

naten in kartesische Koordinaten. Mit Hilfe der Rückwärtstransformation (auch inverse Kinematik genannt) werden aus der Position und Orientierung des TCP die zugehörigen Achswinkel berechnet. Für Sechs-Achsen-Vertikal-Knickarmroboter gibt es analytische Berechnungsverfahren, die nur wenige Rechenschritte benötigen, um eine gültige Lösung für die Rückwärtstransformation zu berechnen. Zudem stehen eine Reihe von numerischen Verfahren zur Verfügung, um für alle Roboterbauformen die Rückwärtstransformation durchzuführen (CHIBISOV 2009; SCHREIBER 2004). Die Beschreibung der Roboterachsen für eine vereinfachte Berechnung der Vorwärts- und der Rückwärtstransformation kann über die Denavit-Hartenberg-Konvention (DH-Konvention) erfolgen (DENAVID & HARTENBERG 1955). Bei der DH-Konvention genügen die vier DH-Parameter ( $\alpha$ ,  $\Phi$ ,  $a$ ,  $d$ ), um die Position der jeweilig nächsten Achse eindeutig zu berechnen.

Die Bewegungsvorgaben der frei programmierbaren Achsen des Roboters und damit die zu erreichenden Posen für die Bearbeitung eines Werkstücks werden in Anwenderprogrammen gespeichert. Die Betrachtung, wie genau ein Industrieroboter ein Anwenderprogramm abfahren kann, gliedert sich in zwei Aspekte. Während die Positioniergenauigkeit nur beschreibt, wie exakt der TCP an einer vorgegebenen Stelle platziert werden kann, umfasst die Bahngenauigkeit zusätzlich die Fähigkeit, die programmierte Position auf einer vorgegebenen Bahn mit einer programmierten Bahngeschwindigkeit zu erreichen. Die Unterteilung der Positioniergenauigkeit in die Absolut- und in die Wiederholgenauigkeit ist in Abbildung 2.16 veranschaulicht. Die Wiederholgenauigkeit beschreibt die durchschnittliche Abweichung, wenn der Roboter eine Pose mehrfach aus der gleichen Richtung und unter konstanten Bedingungen heraus anfährt und die Absolutgenauigkeit ist durch die durchschnittliche Abweichung der angefahrenen Pose bezüglich der kartesisch vorgegebenen Soll-Position definiert. Die Genauigkeitswerte können nach der DIN 9283 (1999) über vordefinierte Prüfzyklen bestimmt werden.

Für die Remote-Laserstrahlbearbeitung muss der Industrieroboter in der Lage sein, den Fokus des Laserstrahls den Anforderungen der Prozesse (Geschwindigkeit, Fokusabstand, usw.) entsprechend über das Werkstück zu führen. Die Stoßgeometrien aus Abbildung 2.4 benötigen unterschiedliche Genauigkeiten bei der Laserstrahlpositionierung, daher sind beim RLW Überlappverbindungen zu bevorzugen (GRUPP ET AL. 2003), um Ungenauigkeiten bei der Roboterprogrammierung und der Bahnaus-

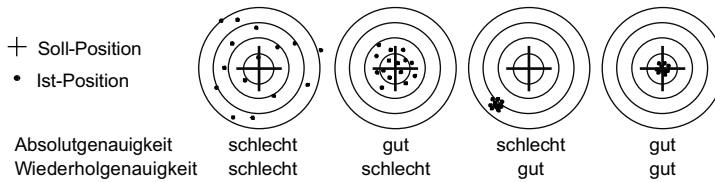


Abbildung 2.16: Absolut- und Wiederholgenauigkeiten von Industrierobotern, in Anlehnung an BEYER (2005)

führung vernachlässigen zu können. Die Anwendungsbeispiele beim Laserstrahlschweißen (Abschnitte 2.1.2.1 und 2.1.2.2) zeigen, dass gängige Industrieroboter über eine ausreichend hohe Genauigkeit für das RLW verfügen. Ebenso können viele Laserstrahlschneidprozesse aus den Abschnitten 2.1.3.1 und 2.1.3.3 mit Hilfe mit Industrierobotern durchgeführt werden.

### 2.7.2 Kinematisch redundante Systeme

Stehen einem Roboter mehr als sechs Achsen in einer kinematischen Kette zur Verfügung, wie bei der Kombination von Industrierobotern und Scanneroptiken, kann er seinen TCP in eine Position mit einer vorgegebenen Orientierung mit beliebig vielen unterschiedlichen Posen anfahren. In diesem Fall wird von einem kinematisch redundanten Roboter oder auch Robotersystem gesprochen. Die Menge aller Posen für eine feste Position des TCP spannt den sogenannten Nullraum auf. Ist der Roboter in der Lage sich zu bewegen, ohne dass sich die Position des TCP verändert, wird dies Nullraumbewegung genannt (SCHREIBER 2004).

Kinematisch redundante Systeme werden in der Industrie bei vielfältigen Aufgaben eingesetzt (z. B. Flugzeugputzroboter (WESTKÄMPER ET AL. 1998), neue Generationen von Schweißrobotern (HAGSPIEL 2010) und Leichtbauroboter mit sieben Achsen (BISCHOFF ET AL. 2010)). Eine Auslagerung von schnellen, hochfrequenten Bewegungen an spezialisierte Kinematiken, die im Werkzeug integriert sind, kann dabei zu einer Reduktion der Gelenkbewegungen im Industrieroboter und zusätzlich zu einer Steigerung der Genauigkeit bei der Bearbeitung führen. Beim robotergestützten Schleifen kann eine luftdruckgeregelte Einheit den Anpressdruck des Werkzeugs konstant halten und dem Roboter das Fah-

ren auf einfachen Bahnen erlauben (NADERER 2010). Gerade im Bereich der robotergestützten Laserstrahlbearbeitung bieten Optiken eine Vielzahl an Möglichkeiten, hochfrequente Bewegungen von den Roboterachsen zu übernehmen. Kurzbrennweitige Optiken können beispielsweise über kapazitive Abstandssensoren verfügen, um über geregelte Linearachsen den Abstand zum Werkstück konstant zu halten, und somit eine geradlinige Führung des Roboters zu ermöglichen (BACKES 1997; SCHNEIDER ET AL. 2009). Bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung kann die große Rayleigh-Länge zu einer verbesserten Roboterbahn führen (RIPPL 2006; ZÄH ET AL. 2008), da der Abstand zum Werkstück variieren kann. Mit der Einführung einer Zoomoptik konnte der Versatz in Strahlrichtung noch weiter ausgenutzt werden, wobei der Fokus des Laserstrahls direkt auf dem Werkstück gehalten wird (MUNZERT 2010; RIPPL 2006).

Durch den Einsatz von Scanneroptiken können die Roboterbewegungen weiter vereinfacht werden. Im Rahmen einer lokalen Bahnoptimierung erfolgt eine Aufteilung der Bewegungen zwischen dem Roboter und der Scanneroptik mit Hilfe eines Frequenzfilters (BRUHM ET AL. 2010). Die hochfrequenten und damit schnellen Bewegungen werden von den Roboterachsen auf die Scannerachsen verlagert. Dies verbessert die Bahntreue bei Konturen mit engen Radien. Überschiffene Ecken (vgl. Abbildung 2.14) einer Schnittkontur werden dadurch besser erreicht (BARTELS ET AL. 2008; BRUHM ET AL. 2010).

Neben der kinematischen Redundanz gibt es auch die aufgabenspezifische Redundanz. Benötigt ein Prozess nicht die Positionierung des Werkzeugs mit allen sechs Freiheitsgraden (siehe Tabelle 2.2), führt schon die Verwendung eines Sechs-Achsen-Vertikal-Knickarm-Roboters zu einem kinematisch redundanten Gesamtsystem, bestehend aus der Aufgabe und dem Roboter. Ein Beispiel hierfür ist das Widerstandspunktschweißen. Wenn die Schweißzange geschlossen ist, kann der Roboter die Schweißzange um den Schweißpunkt drehen. Damit kann der Roboter während des Prozesses weiter zum nächsten Schweißpunkt fahren, um dadurch die Nebenzeiten zu reduzieren (RIPPL 2007). Der Grad der Redundanz des Gesamtsystems  $r$  kann aus der Anzahl der Freiheitsgrade des Roboters  $n$  und den Anforderungen des Prozesses  $m$  nach Gleichung (2.8) berechnet werden (CONKUR & BUCKINGHAM 1997).

$$r = n - m \quad (2.8)$$

Beim Grad der Redundanz kann eine Fallunterscheidung durchgeführt werden, hier vereinfacht nach CONKUR & BUCKINGHAM (1997) zusammengefasst:

- Fall 1:  $n = m$   
Der Roboter besitzt gleich viele Freiheitsgrade, wie zum Lösen der Aufgabe benötigt werden. Das Gesamtsystem ist kinematisch bestimmt und die Aufgabe kann bearbeitet werden. Der Roboter kann die Bearbeitung nur in bestimmten Posen durchführen.
- Fall 2:  $n < m$   
Der Roboter besitzt weniger Freiheitsgrade, als zum Lösen der Aufgabe benötigt werden. Die Aufgabe kann nicht bearbeitet werden.
- Fall 3:  $n > m$   
Der Roboter besitzt mehr Freiheitsgrade, als zum Lösen der Aufgabe benötigt werden. Das Gesamtsystem ist kinematisch redundant und die Aufgabe kann bearbeitet werden. Dem Roboter stehen unendlich viele Posen zur Bearbeitung der Aufgabe zur Verfügung.

Der Grad der Redundanz bei der Laserstrahlbearbeitung ist in Tabelle 2.3 für die Gesamtsysteme, bestehend aus den Laserstrahlpositioniersystemen (vgl. Abbildung 2.2 auf Seite 9) und den beschriebenen Laserstrahlprozessen aus Tabelle 2.2 zusammengefasst. Durch die Kenntnis von  $r$  kann der Nullraum für jeden Prozess bestimmt und im Rahmen einer automatisierten Bahnplanung verwendet werden, um das Anwenderprogramm nach vorgegebenen Kriterien (z. B. der Taktzeit) zu generieren und zu optimieren. Zudem können Hindernisse während der Bearbeitung umfahren werden, ohne Auswirkungen auf die Bearbeitung des Werkstücks zu haben (HOLLERBACH & SUH 1987; SCHREIBER 2004).

### 2.7.3 Programmierarten

Bei der Programmierung der Bewegung von Industrierobotern wird zwischen dem Online- und dem Offline-Programmieren unterschieden (WEBER 2002). Ein Aspekt der Offline-Programmierung ist das aufgabenorientierte bzw. das zielorientierte Programmieren. Diese Programmierart wurde z. B. von BACKES (1997), MUNZERT (2010) und STEMMANN (2006) bei der automatisierten Bahnplanung für unterschiedliche Laserstrahlprozesse eingesetzt und wird aus diesem Grund sepa-

Laserstrahlpositionierung				
Anlagentyp	Kurzbrennweitig	Remote		
Handhabungs- kinematik	Sechs-Achsen-Vertikal-Knickarm-Roboter			
Werkzeug	Optik, kurze Brennweite	Optik, lange Brennweite	Scanneroptik 3D - 3 FHG	Scanneroptik 3D - 3 FHG
Laserstrahlprozesse				
Prozess	Kurzbrennweitig	RLW, RFC	RLW, RFC	RAC
Translatorische Freiheitsgrade	Kleine Tiefenschärfe	Große Tiefenschärfe	Große Tiefenschärfe	Kleine Tiefenschärfe
Rotatorische Freiheitsgrade	Stark begrenzte Einstrahlwinkel, Strahlorientierung	Einstrahlwinkel, Strahlorientierung	Einstrahlwinkel, Strahlorientierung	Einstrahlwinkel, Strahlorientierung
Redundanz				
Freiheitsgrad Strahlpositio- niersystem	6	6	9	9
Anforderung Prozess	5	2 + 3 mit Ein- schränkungen	2 + 3 mit Ein- schränkungen	3 + 2 mit Ein- schränkungen
Grad der Redundanz	1	4	7	6

*Tabelle 2.3: Redundanzgrade verschiedener Laserstrahl-Anlagenkonzepte, in Anlehnung an MUNZERT (2010)*

rat betrachtet. Die Beschreibung der Programmierarten ist in zahlreichen Grundlagenbüchern und Dissertationen über Industrieroboter ausführlich dargestellt (CRAIG 2005; HUMBURGER 1998; SCHREIBER 2004; VOGL 2009; WEBER 2002; WECK & BRECHER 2006). Daher werden an dieser Stelle aus den angegebenen Literaturstellen nur wichtige Begriffe eingeführt, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit Verwendung finden.

Das Online- bzw. das direkte Programmieren erfolgt in der Produktionsumgebung, am Einsatzort des Roboters. Das Teach-In-Verfahren<sup>4</sup> ist dabei am weitesten verbreitet. Die TCP des Roboters wird direkt über ein

<sup>4</sup>Das Wort *teach* stammt aus dem Englischen und steht für *lehren, unterrichten, einlernen*. Es wird beim Roboterprogrammieren als deutsches Wort verwendet, mit anderen Wörtern kombiniert und nach deutscher Grammatik dekliniert.

Handbediengerät (engl. Teach Panel) verfahren und der Anlagenbediener speichert die benötigten Posen im Anwenderprogramm ab. Die Posen können in der Regel mit Punkt zu Punkt (Point to Point, PTP), linearen (LIN), Kreis- oder Spline-Bewegungen miteinander verbunden werden. Auf diese Weise können kleine und einfache Bearbeitungsaufgaben schnell programmiert werden. Der Anlagenbediener muss allerdings mit dem jeweiligen Roboter vertraut sein, da jeder Roboterhersteller ein eigenes Handbediengerät mit einer eigenen Programmiersprache anbietet. Bei großen und komplexen Bearbeitungsaufgaben steigt der Programmieraufwand stark an. Daher muss vor jeder Neuprogrammierung überprüft werden, ob eine Online-Programmierung wirtschaftlich ist oder ob eine andere Programmierart geeigneter ist.

Beim Offline-Programmieren werden Anwenderprogramme abseits der Produktionsumgebung mit Hilfe eines Textverarbeitungsprogramms oder in einer Simulationsumgebung erstellt. Dabei ist ein großer Vorteil, dass der Roboter in der Simulationsumgebung neu programmiert und währenddessen mit der realen Produktionsanlage weiter gearbeitet werden kann. Produktionsstillstandszeiten können somit deutlich reduziert werden. Ein Nachteil ist, dass in der Regel Unterschiede zwischen der realen Produktionsanlage und der Simulation existieren. Zusätzlich kann der Roboter nur im Rahmen seiner Absolutgenauigkeit die vorgegebenen Positionen anfahren. Diese Fehler müssen beim Übertragen der Anwenderprogramme auf die Anlage durch das sogenannte Nachteachen ausgeglichen werden. Dabei werden die simulierten Punkte vom Roboter angefahren und ggf. durch den Anlagenbediener mit Hilfe des Teach-In-Verfahrens nachgebessert (CRAIG 2005).

### 2.7.3.1 Aufgabenorientiertes Programmieren

Eine indirekte Offline-Programmierart ist das aufgaben- bzw. das zielorientierte Programmieren. Bei dieser Programmierart wird nicht die Bewegung des Roboters vorgegeben, sondern es wird ein Zielzustand in Form eines Aufgabenmodells beschrieben. Das Aufgabenmodell kann u. a. aus CAD-Daten des Werkstücks abgeleitet oder mittels eines Zeigestiftes direkt am realen Werkstück in der Spannvorrichtung vorgegeben werden (REINHART ET AL. 2008). Zusätzlich zum Aufgabenmodell wird in einem Umweltmodell die Fertigungsumgebung mit der Handhabungs-kinematik, dem Werkzeug und der Spannvorrichtung erfasst. Mit Hilfe ei-



nes Planungsmoduls (siehe Abbildung 2.17) wird automatisiert aus dem Aufgaben- und dem Umweltmodell, der Aufgabendefinition, das Anwenderprogramm mit expliziten Bewegungsanweisungen erstellt, damit die Roboter in der realen Fertigungsumgebung die gestellte Aufgabe bearbeiten können (HUMBURGER 1998; WEBER 2002). Hier können zudem Ansätze realisiert sein, um das Anwenderprogramm hinsichtlich Taktzeit, Energieverbrauch, kinematischen Randbedingungen, usw. zu optimieren. Die generierten Bahnen für den Roboter können vor einer Übertragung auf die reale Anlage meist in einer Simulationsumgebung begutachtet werden.

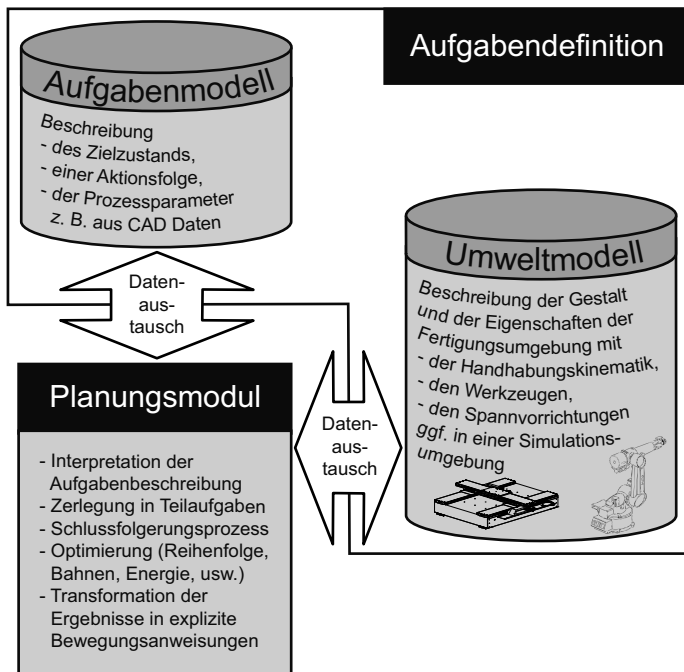


Abbildung 2.17: Grundelemente der aufgabenorientierten Programmierung, in Anlehnung an HUMBURGER (1998) und WEBER (2002)

Gerade bei komplexen, kinematisch redundanten Robotersystemen bietet sich der Einsatz solcher aufgabenorientierter Programmierarten an (WESTKÄMPER ET AL. 1998). Dem Anlagenbediener wird damit die

Möglichkeit gegeben, sich mehr mit der Fertigungsaufgabe zu befassen, um die Qualität zu erhöhen, als Zeit in die Programmierung der Anlage zu investieren.

Eine besondere Form der aufgabenorientierten Programmierung wird als CAD/CAM-Kopplung bezeichnet. Bereits bei der Erstellung von CAD-Daten eines Werkstücks werden fertigungsrelevante Daten (z. B. Schweißbahnen, Schnittkanten) eingezeichnet. Diese Trajektorien werden über einen Postprozessor direkt in ein maschinenlesbares Anwenderprogramm überführt (WECK & BRECHER 2006). Bei Werkzeugmaschinen ist diese Art der Programmierung schon lange Stand der Technik (SCHÄFER 1990) und kann mit verschiedenen kommerziellen Programmen durchgeführt werden.

Im Rahmen einer CAD/CAM-Kopplung kann auch ein Bahnplanungsalgorithmus dazu eingesetzt werden, roboterspezifische Bewegungen für die in CAD-Daten hinterlegten Aufgaben zu berechnen. Diese Bewegungen können auf vorgegebene Kriterien hin optimiert werden, bevor der Postprozessor das Anwenderprogramm erzeugt. WESTKÄMPER ET AL. (1998) zeigen dieses Vorgehen am Beispiel eines Flugzeugputzroboters und VOGL & MUNZERT (2012) präsentieren ein System zur Bahnoptimierung beim RLW. Bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung stellen LÜTKE ET AL. (2010) eine CAD/CAM-Kopplung zum Übertrag von CAD-Daten in Scannerbahnen vor, unter Berücksichtigung der Fahrstrategien, um Ecken (vgl. Abbildung 2.14) zu bearbeiten.

### 2.7.3.2 Automatisierte Programmierung

Die automatisierte Programmierung kann in zwei Bereiche eingeteilt werden. Die globale Bahnplanung erzeugt aus einer abstrakten Aufgabenstellung ein Anwenderprogramm, wohingegen bei der lokalen Bahnplanung ein vorhandenes Anwenderprogramm hinsichtlich bestimmter Kriterien verändert, bzw. optimiert wird. Meist ist eine lokale Bahnplanung auch Teil einer globalen Bahnplanungsmethode. In solchen Fällen wird zuerst eine Initialbahn erzeugt, welche die gestellte Aufgabe lösen kann. Anschließend wird diese Bahn bezüglich eines oder mehrerer Kriterien optimiert (WESTKÄMPER ET AL. 1998).

Bei der automatisierten Planung von Roboterbahnen ist die Vermeidung von Kollisionen ein wichtiger Bestandteil (LAVALLE 2006). Wäh-

rend beim Online-Programmieren alleine dem Anlagenbediener die Verantwortung obliegt, Kollisionen zwischen dem Roboter und seiner Peripherie zu vermeiden, können spezielle Software-Module im Rahmen einer Offline-Programmierung ihn dabei unterstützen. Solche Module sind seit langem in kommerziellen Simulationsumgebungen integriert und VOGL & MUNZERT (2012) zeigen dies bei einer Bahnplanung für das RLW. Bei diesem System wird zusätzlich zum Roboter und zum Werkzeug auch der Laserstrahl bei der Kollisionsprüfung berücksichtigt. Mit Hilfe einer automatischen Bahnoptimierung kann bei einer Kollisionserkennung eine Umfahrung des Hindernisses berechnet werden. Dies ist vor allem beim Einsatz von komplexen Spannvorrichtungen wichtig, die nur eine eingeschränkte Zugänglichkeit für den Laserstrahl erlauben (VOGL & MUNZERT 2012).

## 2.8 Reihenfolgeoptimierung von Schweißnähten und Schnittkanten

Bei der Erstellung eines taktzeitoptimierten Anwenderprogramms müssen unnötige Roboterbewegungen vermieden werden. Deshalb ist der nächste Schritt beim Einsatz von Robotern bei der Laserstrahlbearbeitung die Betrachtung der Reihenfolge der Schweißnähte und der Schnittkanten, damit die Nebenzeiten minimiert werden können.

Die bekanntesten Algorithmen für Reihenfolgeoptimierungen wurden für das Problem des Handlungsreisenden (Travelling Salesman Problem, TSP) geschrieben (APPLEGATE 2007). Der Name dieser Reihenfolgeoptimierung rührt von einer anschaulichen Darstellung her. Ein Handlungsreisender hat die Aufgabe, eine gewisse Anzahl an Städten zu besuchen. Er steht nun vor der Aufgabe, einen möglichst kurzen Weg zwischen den Städten zu finden, damit er möglichst wenig Zeit auf der Straße verliert. Eine Möglichkeit, um an den kürzesten Weg zu gelangen, ist es, alle Wege zu berechnen und dann den Besten auszuwählen. Ab einer gewissen Anzahl an Städten  $n$  führt dieses analytische Verfahren zu einem sehr hohen Rechenaufwand, da die Anzahl an Lösungen  $L$  nach Gleichung (2.9) überexponentiell ansteigt. Eine Zusammenfassung an numerischen Verfahren zur Lösung des TSP ist in APPLEGATE (2007) gegeben.

$$L = (n - 1)! \tag{2.9}$$

Besteht eine Aufgabe aus dem Abfahren von Schweißnähten oder Schnittkanten kommen noch weitere Charakteristiken im Vergleich mit Städten hinzu. Eine Schweißnaht besteht aus einer geometrischen Figur, z. B. einer Linie. Diese Figur kann meist in beiden Richtungen abgefahren werden. Damit erhöht sich der Lösungsraum für das TSP, siehe Gleichung (2.10) (MUNZERT 2010). Die gleiche Annahme kann auch für Schnittkanten getroffen werden.

$$L = (n - 1)! \cdot 2^n \quad (2.10)$$

Nach einer Verbindung aller Städte bzw. Bearbeitungsfiguren zu einer geschlossenen Kontur wird von einem sogenannten Hamilton-Kreis gesprochen. Das Ziel der Optimierung ist dann, einen möglichst kurzen Umfang dieses Kreises zu berechnen (APPLEGATE 2007).

Beim RLW sind zwei Arbeiten im Bereich der Schweißnahtsortierung zu nennen. In MUNZERT (2010) wird ein Sortieralgorithmus basierend auf k-Opt-Algorithmen aus der Klasse der Verbesserungsheuristiken angepasst, um den speziellen Eigenschaften des RLW für Industrieroboter mit Fest- und Zoomoptiken zu genügen. STEMMANN (2006) stellt in seiner Dissertation einen Sortieralgorithmus vor, um beim RLW mit Scanneroptiken möglichst wenige Posen über dem zu bearbeitenden Werkstück anfahren zu müssen. Beide Verfahren sind darauf ausgelegt, dass nach einem möglichst kurzen Rechenvorgang eine nahezu optimale Lösung erhalten wird.

### 2.9 Bahnplanungsmethoden bei der robotergeführten Laserstrahlbearbeitung

Im letzten Abschnitt des Stands der Technik werden vorhandene Bahnplanungsmethoden bei der Laserstrahlbearbeitung und insbesondere bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung gezeigt. Die hier beschriebenen Vorarbeiten bilden das Fundament dieser Dissertation. Der Abschnitt wird mit einem Überblick über die sensorgeführte Laserstrahlbearbeitung begonnen, die derzeit immer mehr an Bedeutung gewinnt. Anschließend werden nach einer Beschreibung von Arbeiten über Bahnplanungsmethoden für Optiken mit kurzen Brennweiten die relevanten Arbeiten für die Remote-Laserstrahlbearbeitung gezeigt.

### 2.9.1 Sensorgeführte Laserstrahlbearbeitung

Die exakte Positionierung des Laserstrahls auf dem Werkstück ist essentiell für die Qualität der Bearbeitung. Um die Genauigkeitsanforderungen beim RLW zu reduzieren, werden häufig Überlappverbindungen geschweißt. Der Einsatz von Stumpfstößen hat das Potenzial Material einzusparen, allerdings muss der Laserstrahl hierfür sehr viel genauer über das Werkstück geführt werden. Toleranzen beim Spannen der Werkstücke und bei der Bahnausführung können schnell zu einer verminderten Qualität der Schweißung führen, da der Laserstrahl nicht mehr beide Fügepartner aufschmelzen kann.

Sind die Toleranzen beim Spannen der Werkstücke so groß, dass eine durch das Roboteranwenderprogramm vorgegebene Positionierung des Laserstrahls nicht die Genauigkeitsanforderungen des Prozesses erfüllt, kann mit Hilfe von Sensoren seine Position im Rahmen einer lokalen Bahnplanung aktiv nachgeregelt werden. Dabei werden bei Stumpfstößen die Kanten der aneinander grenzenden Werkstücke erkannt, meist mit optischen Sensoren, und können dadurch trotz Toleranzen beim Spannen getroffen werden. Arbeiten hierzu wurden für das kurzbreitweitige Schweißen von REEK (2000) durchgeführt. Beim RLW mit Scanneroptiken wird in MEISSNER ET AL. (2009) die Position des Werkstücks und damit der Schweißnaht über Kameras erfasst und das Programmieren der Anlage erfolgt automatisiert. Eine Möglichkeit zur Kalibrierung dieses Systems wird in EMMELMANN ET AL. (2011) gezeigt. Ein Einsatz dieses Systems ist auch beim Laserstrahlschneiden möglich.

Neben der Positionierung spielt die Geschwindigkeit des Laserstrahls auf dem Werkstück eine große Rolle für die sich einstellende Qualität der Schweißnähte und der Schnittkanten. FRANZ ET AL. (2011) stellen ein System vor, um mit optischen Sensoren die Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück zu messen. Durch eine entsprechende Regelung des Roboters kann damit die in das Werkstück eingebrachte Streckenenergie konstant gehalten werden.

Der Einsatz von Sensorik ist bei vielen Aufgabenstellungen sinnvoll. Allerdings muss dabei im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsrechnung sichergestellt werden, dass der zusätzliche technische und wirtschaftliche Aufwand gerechtfertigt ist. Zu berücksichtigen ist zudem, dass mit der Verwendung von zusätzlicher Hardware auch die Ausfallwahrscheinlichkeit ansteigt.

### 2.9.2 Laserstrahlbearbeitung mit kurzen Brennweiten

Schon in den 1990er Jahren wurde das Thema der Bahnplanung für Industrieroboter bei der Laserstrahlbearbeitung untersucht. Erste wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Gebiet wurden von GARNICH (1992) durchgeführt. Die Arbeit beinhaltet die Entwicklung eines Offline-Programmiersystems mit einer grafischen Benutzeroberfläche und einer Technologie-Datenbank, in der Schweiß-Parameter für unterschiedliche Materialien und Blechdicken hinterlegt sind. Der Hauptteil der Arbeit besteht in einer Bewertung der vorhandenen Systemtechnik für die Prozesse Schweißen und Schneiden.

BACKES (1997) beschreibt in seiner Arbeit die automatisierte Programmierung von Industrierobotern mittels eines aufgabenorientierten Ansatzes für die 3D-Laserstrahlbearbeitung. Durch die kurzen Brennweiten bewegt der Industrieroboter die Optik direkt entlang der Schweißnaht bzw. der Schnittkante, die in einem Kontur- und Bahnmodell abgebildet sind. Trotzdem werden schon bei diesem Ansatz die Freiheitsgrade des Prozesses genutzt, um die Bahnen des Roboters zu vereinfachen. Zudem wird über eine adaptive Optik, welche durch einen z-Hub die Fokusslage anpassen kann, und eine Steuerung der Laserleistung eine Krümmungsreduktion durchgeführt, damit der Roboter auch bei sehr engen Radien die geforderte konstante Streckenenergie einbringen kann.

Um die Radien bei einer konstanten Geschwindigkeit noch weiter zu verkleinern, wird in BEYER ET AL. (2011) eine Optik vorgestellt, welche die Schneiddüse zusammen mit einer Gasdüse in einem  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  großen Feld hochdynamisch verfahren kann. Durch eine überlagerte Bewegung mit einer Führungsmaschine kann die Konturtreue und damit die Qualität beim Schneiden deutlich verbessert werden. Die Kontur wird dabei in hoch- und niederfrequente Bewegungen aufgeteilt. Die niederfrequenten und großen Bewegungen werden mit der Führungsmaschine abgefahren und die schnellen, hochfrequenten Bewegungen von der neuen Optik.

### 2.9.3 Remote-Laserstrahlbearbeitung

Die Bahnplanung bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung kann in drei Bereiche aufgeteilt werden. Bei der scannerlosen Bearbeitung wird der

## 2.9 Bahnplanungsmethoden bei der robotergeführten Laserstrahlbearbeitung

---

Laserstrahl ausschließlich mittels einer Optik oder einer Zoomoptik fokussiert und durch die Bewegungen des Roboters auf dem Werkstück positioniert. Eine Scanneroptik ist bei den weiteren Bereichen die zentrale Komponente für die Laserstrahlpositionierung. Da das Bearbeitungsfeld einer Scanneroptik engen Begrenzungen unterliegt, werden von LÜTKE ET AL. (2009) zwei Möglichkeiten zu dessen Vergrößerung vorgeschlagen. Zum einen kann die Scanneroptik diskret bewegt werden und das Werkstück abschnittsweise bearbeiten, das *Patchen* bzw. das *Point&Shoot* (P&S). Der Roboter dient dabei als „flexibles Stativ“. Zum anderen kann eine kontinuierliche Bewegung von Handhabungskinematik und Scanneroptik bei der *fliegenden Bearbeitung* durchgeführt werden.

### 2.9.3.1 Scannerlose Bearbeitung

MUNZERT (2010) hat sich im Rahmen seiner Dissertation ausschließlich mit dem robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen von Fest- und Zoomoptiken befasst und ein System erstellt, um mittels einer aufgabenorientierten, globalen Programmierung zeitoptimierte Roboterbahnen zu generieren. Die vorgestellte Methode gliedert sich in drei Schritte: Nach einer Sortierung der Reihenfolge der Schweißnähte und Erzeugung einer initialen Bahn wird diese im zweiten Schritt unter Verwendung der vom Prozess möglichen Einstrahlwinkel geglättet und gekürzt. Eine abschließende Geschwindigkeitsanpassung führt insgesamt zu minimalen Prozessnebenzeiten und einer Verlagerung der hochfrequenten Bewegungen von den schweren Hauptachsen hin zu den agilen Handachsen.

CHIBISOV (2009) nutzt die Moore-Penrose Pseudo-Inverse-Matrix um eine Lösung für die Rückwärtstransformation des aufgabenspezifisch redundanten Systems, bestehend aus Schweißaufgabe und Industrieroboter, zu berechnen. Über eine Spline-Bewegung werden dabei zeitoptimierte Roboterbahnen generiert.

Der industrielle Einsatz des scannerlosen RLW mittels Fest- und Zoomoptiken wird von RIPPL (2006) an den Beispielen Türen- und Sitzfertigung vorgestellt, wobei der Roboter unter Verwendung der zulässigen Einstrahlwinkel verfahren wird. Während diesem System eine Online-Programmierung zu Grunde liegt, wird in GÖTZ (2003) eine Hilfsfunktion gezeigt, die über eine lokale Bahnplanung das händisch erstellte Anwenderprogramm zeitlich optimiert. Dazu werden die Bewegungen der Hauptachsen so gering wie möglich gehalten.

### 2.9.3.2 Point&Shoot Bearbeitung

STEMMANN (2006) hat in seiner Dissertation eine Methode vorgestellt, um mit möglichst wenig Posen des Roboters alle Schweißnähte eines Werkstücks bearbeiten zu können. Die Berechnung der Posen erfolgt dabei automatisiert. Er macht sich die hohen Geschwindigkeiten der Scanneroptik zu nutze, indem er davon ausgeht, dass die Versatzzeit zwischen den einzelnen Schweißnähten, welche im Bearbeitungsfeld der Scanneroptik liegen, vernachlässigbar klein sind. Damit setzt sich die gesamte Bearbeitungszeit der Aufgabe aus der Prozesszeit und der Zeit, die für die Neupositionierung des Roboters benötigt wird, zusammen.

### 2.9.3.3 Fliegende Bearbeitung mit Scanneroptiken

Die RobotSyncUnit (ROFIN GROUP 2013; VOGL & MUNZERT 2012) und RobScan (BECKER ET AL. 2008) werden derzeit industriell beim fliegenden RLW eingesetzt. Bei beiden Systemen wird die aktuelle Roboterposition ausgelesen bzw. aufgezeichnet und mit den Positionsdaten der Scanneroptik wird der Laserstrahl zielgenau auf das Werkstück abgelenkt. Die RobotSyncUnit bietet zudem die Möglichkeit, Bahnen im Vorfeld offline zu planen und mit einer Best-Fit-Strategie einen Abgleich zwischen der Simulationsumgebung und der Realität vorzunehmen.

Ein Industrieroboter, bei dem die sechste Achse durch eine Scanneroptik ersetzt wurde, wird von MENIN (2002) gezeigt. Dies vereinfacht die Programmierung, da nur ein System mit integrierter Strahlführung bedient werden muss.

Im Forschungsprojekt LARISSA – LaserRobotik – Integration von Scan- und Fokussiereinheiten als hochdynamische System-Achsen – wurde eine lokale Bahnplanung entwickelt, die über eine Frequenzanalyse die Bewegungen zwischen dem Roboter und der Scanneroptik aufteilt (BRUHM ET AL. 2010). Die Achsen der Scanneroptik werbei dabei direkt vom Roboter aus angesteuert.

In KLOTZBACH ET AL. (2009) wird das Zuschneiden von Textilien mit einer fliegenden Bewegung zwischen Scanneroptik und Werkstück gezeigt. Die Textilien werden bei der Bearbeitung unter zwei Scanneroptiken auf einem Förderband bewegt. Da der Schnitt mit einer Belichtung erzeugt wird, sind sehr hohe Prozessgeschwindigkeiten realisierbar.



## 3 Ausgangssituation und Zielbeschreibung

In diesem Kapitel wird basierend auf dem Stand der Technik die Ausgangssituation dieser Arbeit beschrieben. Hieraus werden der Handlungsbedarf und die Zielsetzung abgeleitet.

### 3.1 Ausgangssituation

Eine Übersicht der bisherigen Arbeiten in Bezug auf die robotergeführte Laserstrahlbearbeitung mit den zugehörigen Veröffentlichungen ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Der Stand der Technik ist darin aufgeteilt in Prozessuntersuchungen zum RLW und RAC sowie in die Roboterprogrammierung von kinematisch bestimmten und kinematisch redundanten Systemen. Die direkten Vorarbeiten dieser Dissertation sind in der Rubrik Laserstrahlpositionierung zusammengefasst und in der letzten Rubrik sind Arbeiten zu relevanten industriellen Anwendungen genannt.

Das RLW hat sich in den letzten Jahren in der industriellen Fertigung etabliert. Diesem industriellen Einsatz liegen umfangreiche Prozessuntersuchungen und ein breites Wissen über die Programmierung von kinematisch redundanten Robotersystemen zu Grunde. Intuitive Programmiersysteme stehen gegenwärtig zur Verfügung, um taktzeitoptimierte Anwenderprogramme für das RLW automatisiert zu generieren. Der Ansatz des aufgabenorientierten Programmierens hat sich in diesem Zusammenhang in vielen Arbeiten bewährt und die damit erreichbaren Strahl-nutzungszeiten von bis zu 90 % zeugen von einer sehr hohen Produktivität. Vorhandene Bahnplanungsmethoden für Industrieroboter, sei es mit oder ohne einer Scanneroptik, werden nur für das RLW eingesetzt, können aber auch für das RFC verwendet werden, sofern die Bahnplanung für geschlossene Konturen unterstützt wird.

Die stete Weiterentwicklung der Laserstrahlquellen hat neue Prozesse wie das RAC ermöglicht. Erste wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass der Prozess ein hohes Potenzial besitzt, um Fertigungszeiten beim

### 3 Ausgangssituation und Zielbeschreibung

Schneiden durch den Remote-Einsatz deutlich zu reduzieren. Im Dünnblechbereich kann das RAC sogar mit Verfahren wie dem Stanzen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit konkurrieren. Im Gegensatz zum RLW gibt es für das RAC bisher keine Bahnplanungsmethoden, um eine fliegende Bearbeitung zu ermöglichen. Vorhandene Systeme für das RLW nutzen eine externe Steuerung, um den Laserstrahl durch eine Scanneroptik in Bezug zur Position des Roboters auszulenken. Aufgrund der hohen Prozessgeschwindigkeiten beim RAC ist dieser Ansatz nicht geeignet.

Stand der Technik bei der Laserstrahlbearbeitung			
Prozess- untersuchung	Remote-Laserstrahlschweißen		Remote-Laserstrahlschneiden
	STEMMANN 2006 TSOUKANTAS ET AL. 2008 KRAETZSCH ET AL. 2011 OFELE 2012		PIHLAVA ET AL. 2010 LÜTKE 2011 MUSIOL ET AL. 2011 OLSEN 2011
Roboter- programmierung	Kinematisch bestimmt		Kinematisch redundant
	HUMBURGER 1998		HOLLERBACH & SUH 1987 CONKUR & BUCKINGHAM 1997 WESTKÄMPER ET AL. 1998 SCHREIBER 2004
Laserstrahl- positionierung	Kurzbrennweitig	Remote, scannerlos	Remote, scannerbasiert
	GARNICH 1992 BACKES 1997 REEK 2000 BARTELS ET AL. 2008	GÖTZ 2003 RIPPL 2006 MUNZERT 2010	GRUPP ET AL. 2003 STEMMANN 2006 BECKER ET AL. 2008 LÜTKE ET AL. 2009 BRUHM ET AL. 2010
Industrieller Einsatz	Remote-Laserstrahlschweißen		Remote-Laserstrahlschneiden, mögliche Anwendungen
	HAMMER & BROCKMANN 2006 ELSNER 2008 BAUR 2009 HAVRILLA ET AL. 2011 VOGL & MUNZERT 2012		ZAH ET AL. 2009 LÜTKE 2011 MUSIOL ET AL. 2012

Abbildung 3.1: Übersicht über den Stand der Technik und relevanter Vorarbeiten bei der robotergeführten Laserstrahlbearbeitung, aus denen sich der Handlungsbedarf und die Zielsetzung der vorliegenden Dissertation ableiten lässt.

### 3.2 Handlungsbedarf

Ein breiter industrieller Einsatz des RAC erfordert ein umfangreiches Prozesswissen und ein intuitives Programmiersystem, wie beim RLW. Vorhandene Programmiersysteme sind bisher nur auf das RLW ausgelegt. Daher ist es erforderlich, das zur Verfügung stehende Prozesswissen über das RAC (siehe Abschnitt 2.1.3.3) im Bezug auf eine fliegende Bearbeitung hin zu untersuchen, um die Vorteile der robotergeführten Remote-Laserstrahlbearbeitung mit Scanneroptiken auch beim RAC zum Einsatz zu bringen. Anschließend werden neue Bahnplanungswerkzeuge benötigt, um eine geeignete Aufteilung der Laserstrahlbewegung zwischen Handhabungskinematik und Scanneroptik zu realisieren, damit nahezu beliebige Konturen bearbeitet werden können (BARTELS ET AL. 2008). Eine Weiterentwicklung solch eines Bahnplanungswerkzeugs, wie es z. B. von MUNZERT (2010) für das scannerlose RLW vorgestellt wurde, zur Programmierung einer flexiblen Fertigungszelle, um sowohl Schneid- als auch Schweißaufgaben unter Verwendung der Vorteile von Scanneroptiken durchzuführen, vergrößert das Einsatzgebiet im industriellen Umfeld.

Zusätzlich sind die Verwendung von standardisierten Komponenten, wie Laserstrahlquelle, Handhabungskinematik und Scanneroptiken sowie benutzerfreundlichen Programmiersystemen ausschlaggebend, um die Potenziale einer Remote-Laserstrahlbearbeitung voll auszuschöpfen (EMMELMANN 2005).

### 3.3 Zielbeschreibung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist das Bereitstellen einer Bahnplanungsmethode zur automatisierten Programmierung von Industrierobotern und Scanneroptiken für einen Einsatz des RAC und von Prozesskombinationen in der industriellen Fertigung. Diese Methode soll in existierende Programmiersysteme integrierbar sein, um vorhandene Benutzerschnittstellen verwenden zu können.

Eine hohe Akzeptanz von Seiten der Anwender soll durch die Verwendung von standardisierten und damit konventionell erhältlichen Hardware-Komponenten (Standard-Hardware) erreicht werden. Daraus folgt das Ziel, ein Zusammenspiel der einzelnen Hardware-Komponenten mit

### 3 Ausgangssituation und Zielbeschreibung

---

ihren Steuerungen als ein Ganzes zu erreichen, um eine fliegende Bearbeitung von Handhabungskinetik und Scanneroptik nahezu beliebiger Hersteller zu ermöglichen.

Ein weiteres Ziel besteht in einer Steigerung der Produktivität, indem Algorithmen zur Verkürzung der unproduktiven Prozessnebenzeiten entwickelt und in die Bahnplanungsmethode integriert werden.

Ein solches Programmiersystem für das RAC und Prozesskombinationen versetzt einen Materialbearbeitungsexperten in die Lage, die komplexe Systemtechnik, bestehend aus Handhabungskinetik und Scanneroptik programmieren zu können, ohne explizite Kenntnisse der einzelnen Maschinensprachen zu besitzen. Eine einfache und schnelle Vorgabe der Bearbeitungskonturen sowie der zugehörigen Prozessparameter in kommerziell erhältlichen Programmierungsumgebungen soll für den Materialbearbeitungsexperten ausreichend sein, um nach einer automatisierten Bahnplanung für die Komponenten der Remote-Laserstrahlanlage die taktzeitoptimierte Bearbeitung zu starten.

#### 3.4 Vorgehensweise

Als Grundlage für ein Programmiersystem für das RAC und für Prozesskombinationen eignen sich entsprechende Systeme für das RLW. Diese Systeme verfügen über Benutzerschnittstellen zur Eingabe der Konturen der Schweißnähte und der zugehörigen Prozessparameter. Zudem halten sie Möglichkeiten zur Darstellung der Remote-Laserstrahlanlage in einer Simulationsumgebung und zur Ansteuerung der Hardware bereit. Eine Bahnplanungsmethode für das RAC wird in ein erweitertes Programmiersystem integriert, nachdem die Modelle für die Remote-Laserstrahlanlage (Umweltmodell) und die Fertigungsaufgabe (Aufgabenmodell) auf die Parameter der neuen Prozesse angepasst sind.

Die Entwicklung der Bahnplanungsmethode für das RAC erfolgt in einem Planungsmodul im Rahmen einer aufgabenorientierten Programmierung, um die Eingangsdaten unabhängig vom Programmiersystem verwenden zu können. Die angestrebten Eigenschaften des Planungsmoduls sind für solch eine Bahnplanungsmethode in Abbildung 3.2 zusammengefasst. Grundlage der Entwicklung ist die Berücksichtigung von zwei Randbedingungen: Integration von vorhandenem Prozesswissen, um mehrere Laserstrahlprozesse in einer flexiblen Fertigungszelle anwenden zu können;

Einsatz von Standard-Hardware, damit die Bahnplanungsmethode in bestehenden Laserstrahlanlagen integriert werden kann. Zur Reduktion der Komplexität der Fertigung werden nur die Hardware-Komponenten, welche im Umweltmodell hinterlegt sind, ausgewählt, die für die Bearbeitung der Fertigungsaufgabe erforderlich sind.

Anforderungen an die Entwicklung und Umsetzung einer Bahnplanungsmethode zur Realisierung einer automatisierten CAD/CAM-Kopplung für den flexiblen Einsatz von RAC und RLW in der industriellen Fertigung unter Verwendung von Standard-Hardware.		
Rand- bedingungen	Integration von Prozesswissen	Verwendete Hardware
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realisierung von RAC und RLW in einer flexiblen Fertigungszelle</li> <li>- Wechsel zwischen unterschiedlichen Prozessen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einsatz von Standard-Robotern und Standard-Scanneroptiken</li> <li>- Keine spezialisierten Sonderkomponenten</li> </ul>
Automatisierte Planung von	Bahnen für den Roboter	Bahnen für die Scanneroptik
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Möglichst kurze und glatte Bahnen für eine kurze Taktzeit (globale Bahnplanung)</li> <li>- Nutzen des großen Arbeitsraums</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzen der hohen Geschwindigkeit für schnelle Transferbewegungen im Bearbeitungsfeld</li> <li>- Nutzen der hohen Präzision</li> </ul>
Verarbeitung der Aufgabe	Flexibilität beim Einsatz von Hardware	Automatisierte CAD/CAM-Kopplung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kein Wissen über den Roboter oder Scanneroptik beim Anwender nötig</li> <li>- Verwendung von modularen Postprozessoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgabenorientiertes Vorgeben beliebiger Konturen von Schweißnähten und Schnittkanten</li> <li>- Nur erforderliche Systeme werden ausgewählt und verwendet</li> </ul>

Abbildung 3.2: Anforderungen an die automatisierte Bahnplanungsmethode

Ausgehend von diesen beiden Randbedingungen werden die Bahnen für den Roboter und die Scanneroptik im Planungsmodul berechnet. Das zugehörige Bahnplanungswerkzeug wird aufgeteilt in die Planung von Bahnen für den Roboter, um die Reichweite in seinem 3D-Arbeitsraum zu nutzen und die Scanneroptik präzise zum Werkstück auszurichten sowie von Bahnen für die Scanneroptik, welche den Laserstrahl mit den nötigen Bearbeitungsgeschwindigkeiten entlang der Konturen der Schweißnähte und der Schnittkanten führt. Die hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten der Prozesse RAC und RLW führen zusammen mit einer Reduzierung der Nebenzeiten zu einer taktzeitoptimierten Bearbeitung der Werkstücke.

### 3 Ausgangssituation und Zielbeschreibung

---

Als Ausgabe der Bahnplanungsmethode werden maschinenlesbare Anwenderprogramme über Postprozessoren geschrieben, um Standard-Hardware für die fliegende Bearbeitung mit Handhabungskinematiken und Scanneroptiken einsetzen zu können.

Die Verarbeitung einer Aufgabendefinition in solch einem Bahnplanungswerkzeug führt zu einem flexiblen Einsatz von Standard-Hardware, bei dem der Anlagenprogrammierer nicht die Hardware, sondern die Aufgabe programmiert und die Anwenderprogramme automatisiert an die jeweiligen Steuerungen übertragen werden. Dies entspricht einer automatisierten CAD/CAM-Kopplung, wobei die benötigte Hardware nach der Vorgabe der Konturen ausgewählt und programmiert wird.

## 4 Programmiersystem für die Remote-Laserstrahlbearbeitung

Zur wirtschaftlichen Nutzung der noch neuen und teuren Grundmode-Laserstrahlquellen, müssen die Neben- und die Rüstzeiten, während denen der Laserstrahl ausgeschaltet ist, minimiert werden. Die Nebenzeiten entstehen erstens durch das Neu- oder Umprogrammieren der Anlage. Zweitens wird der Laserstrahl bei Transferbewegungen zwischen zwei Schweißnähten bzw. Schnittkanten sowie drittens beim Einlegen eines neuen Werkstücks ausgeschaltet. Für eine Verkürzung der Zeit für das Einlegen von Werkstücken stehen spezialisierte Spannvorrichtungen für Remote-Laserstrahlprozesse zur Verfügung (BERGMANN 2009a). Durch eine Integration einer automatisierten Bahnplanung zur Positionierung des Laserstrahls auf dem Werkstück in ein Programmiersystem für das RAC können die ersten beiden Nebenzeiten verringert werden. Die Programmierzeit wird deutlich reduziert, wenn das Anwenderprogramm nicht händisch per Teach-In erstellt, sondern eine automatisierte Offline-Programmierung eingesetzt wird. Dies führt zudem zu einer Minimierung der Transferbewegungen, wenn in der Offline-Programmierung eine passende Optimierung implementiert ist.

Ein Programmiersystem für das aufgabenorientierte Programmieren von Robotern und Scanneroptiken für die Remote-Laserstrahlbearbeitung ist in Abbildung 4.1 gezeigt. Der Aufbau ist an kommerziell erhältliche und industriell bewährte Systeme für das RLW wie z. B. BECKER ET AL. (2008), ROBOTMASTER (2012) und VOGL & MUNZERT (2012) angelehnt und für die Bearbeitung mittels RAC und Prozesskombinationen erweitert. Kommerzielle Programmiersysteme für das RLW bieten Module für intuitive Benutzerschnittstellen, für einfache Darstellungen der Fertigungszelle in Simulationsumgebungen, für automatisierte Bahnplanungen und für die Ansteuerung der Hardware-Komponenten. Die Benutzerschnittstellen der Programmiersysteme können auch bei den neuen Prozessen verwendet werden, da im Aufgabenmodell der Schweißnähte und der Schnittkanten die gleichen Parameter eingesetzt werden.

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

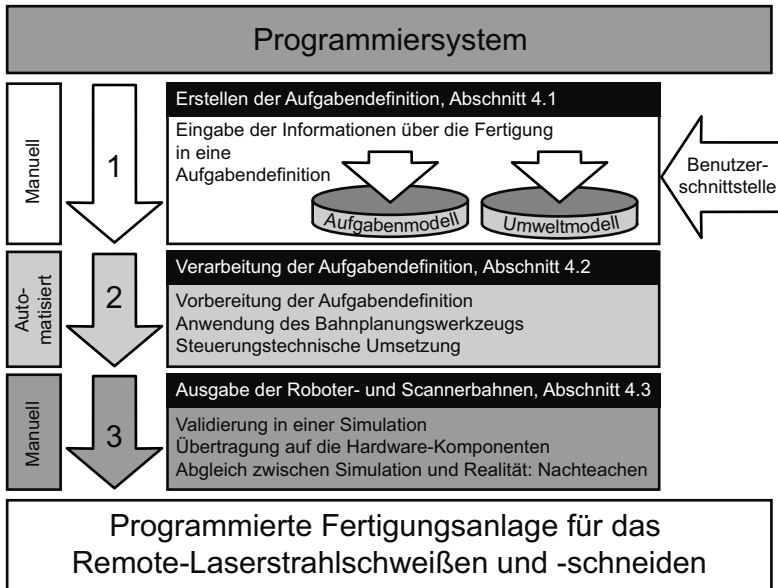


Abbildung 4.1: Aufbau eines Programmiersystems für eine Remote-Laserstrahlfertigungsanlage

Das Vorgehen zur Bearbeitung eines neuen Werkstücks unter Einsatz des Programmiersystems aus Abbildung 4.1 gliedert sich in drei Phasen. Zuerst werden über die Benutzerschnittstellen Informationen über die Fertigungszelle mit allen Hardware-Komponenten eingegeben. Daraus wird automatisch ein Umweltmodell erstellt. Sofern CAD-Daten dieser Komponenten vorhanden sind, können sie in eine Simulationsumgebung zur virtuellen Darstellung der Fertigungszelle integriert werden. Neben dem Umweltmodell werden über die Benutzerschnittstellen Informationen über die zu bearbeitenden Schweiß- und Schneidkonturen mit den zugehörigen Prozessparametern eingegeben. Diese Daten werden in ein Aufgabenmodell geschrieben. Die erstellte Aufgabendefinition, bestehend aus dem Umwelt- und dem Aufgabenmodell, bildet nach Abbildung 2.17 auf Seite 43 die Eingangsdaten für ein Planungsmodul im Rahmen einer aufgabenorientierten Programmierung. Die zweite Phase im Programmiersystem besteht aus einer automatisierten Berechnung der Bahnen für die Hardware-Komponenten zur Bearbeitung der Werkstücke in



einem Planungsmodul. Hierfür werden neue Bahnplanungsmethoden für das RAC benötigt. Die Ergebnisse der Bahnplanung werden in der dritten Phase in der Simulationsumgebung dargestellt, um sie überprüfen zu können. Dann werden die erstellten Bahnen und Anwenderprogramme auf die Hardware-Komponenten überspielt und getestet, damit anschließend mit der realen Fertigung begonnen werden kann.

### 4.1 Phase 1: Erstellen der Aufgabendefinition

Die Aufgabendefinition besteht nach Abbildung 2.17 aus einem Umwelt- und einem Aufgabenmodell. In diesem Abschnitt werden eine mögliche Fertigungsumgebung für das RAC und RLW gezeigt und die relevanten Eigenschaften der Hardware-Komponenten für die Bahnplanung beschrieben. Zudem werden ein Aufgabenmodell in Anlehnung an MUNZERT (2010) vom RLW auf das RAC erweitert und Methoden gezeigt, wie die Geometrie- und die Prozess-Informationen in dieses integriert werden können.

#### 4.1.1 Beschreibung des Umweltmodells

Die Hardware-Komponenten einer Laseranlage für das RAC und das RLW, wie sie in DIN 11145 (2008) genormt sind (siehe Abbildung 2.1), werden in den folgenden Unterabschnitten mit ihren jeweiligen Eigenschaften und Schnittstellen näher betrachtet. Eine Zusammenfassung dieser Eingangsdaten für die automatisierte Bahnplanung ist in einem Umweltmodell in Abbildung 4.2 gegeben. Bei der Laserstrahlbearbeitung werden eine Vielzahl an unterschiedlichen Systemen zur Laserstrahlpositionierung eingesetzt. Durch eine hierarchische und modulare Beschreibung des Umweltmodells nach Abbildung 4.3 können in der Simulationsumgebung die Handhabungskinetik und die Scanneroptik einfach an die realen Hardware-Komponenten angepasst werden, indem die Parameter aktualisiert werden. Die Optik wird der Handhabungskinetik angegliedert, da die Handhabungskinetik die Optik relativ zum Werkstück positioniert. Die veränderten Daten und Eigenschaften werden automatisch im Umweltmodell übernommen und stehen im Planungsmodul für die Bahnplanung zur Verfügung.

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

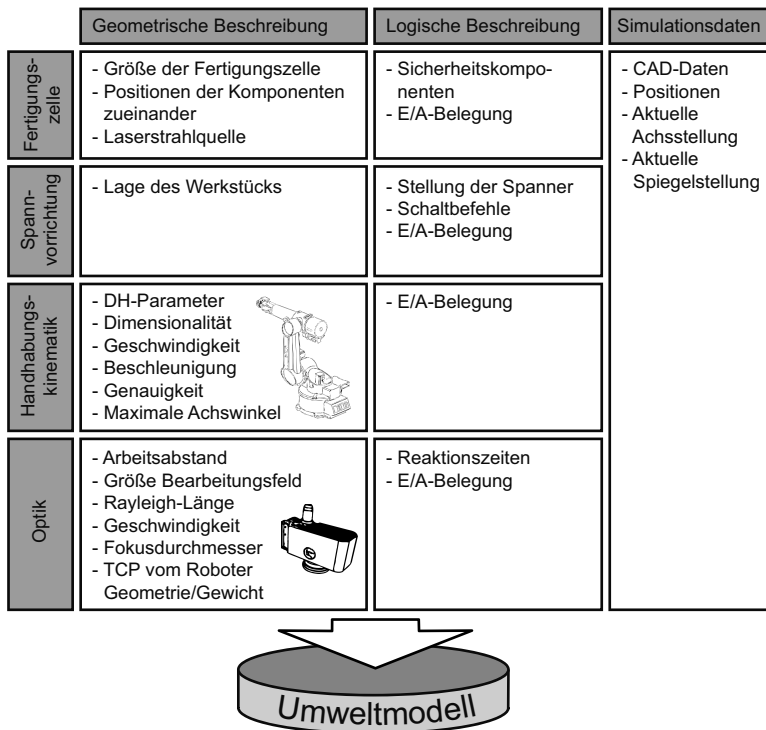


Abbildung 4.2: Beschreibung der Fertigungszelle in einem Umweltmodell

### 4.1.1.1 Die Fertigungszelle

Die Fertigungszelle bildet die oberste Ebene des Umweltmodells. Ihre Beschreibung beinhaltet alle Systemkomponenten ohne bewegliche Teile, wie die Laserstrahlquelle und die Lasersicherheitseinrichtung sowie die Positionen aller Komponenten zueinander. Aus den Positionen der Komponenten, wie Industrieroboter und Portalanlage, sowie der Größe der Fertigungszelle kann berechnet werden, wo die Spannvorrichtung aufgestellt werden sollte, damit die Scanneroptik über allen Schweißnähten und Schnittkanten positioniert werden kann.

Bei der Laserstrahlquelle muss die Belegung der Ein- und Ausgänge (E/A-Belegung) im Umweltmodell hinterlegt werden, damit sie durch

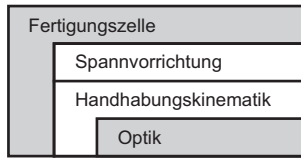


Abbildung 4.3: Datenstruktur des Umweltmodells

die anderen Komponenten gesteuert werden kann. Dies beinhaltet das Einschalten der Laserstrahlquelle, die Aktivierung der Laserstrahlemission sowie die Abfrage von Status- und Fehlermeldungen.

Sicherheitskomponenten, wie z.B. Sensoren in den Türen oder in den Wänden, sollten ebenfalls im Umweltmodell berücksichtigt werden, damit dem Benutzer an einem zentralen Bedienpult, wie z.B. auf dem Handbediengerät der Robotersteuerung, Fehler mitgeteilt werden können.

### 4.1.1.2 Die Spannvorrichtung

Die zu bearbeitenden Werkstücke müssen für die Remote-Laserstrahlbearbeitung sehr genau positioniert werden. Hierzu kommen spezialisierte Spannvorrichtungen zum Einsatz, bei denen eine einseitige Zugänglichkeit vorgesehen ist und die Werkstücke bei den Schweißnähten fest fixiert werden (BERGMANN 2009a). Um den thermisch bedingten Verzug des Werkstücks beim Schneiden zu reduzieren, werden die Werkstücke meist flächig gespannt.

Die Spannvorrichtung kann über unterschiedliche Zustände verfügen, wie z.B. offen; Spannzustand A, gültig für die Schweißnähte auf einer Seite des Bauteils; Spannzustand B, gültig für die restlichen Schweißnähte. Zusätzlich müssen bei Remote-Anwendungen Schutzgas oder lokale Absauganlagen in die Spannvorrichtung integriert und gesteuert werden (OEFELE 2012). Diese Zustände können in der logischen Beschreibung der Spannvorrichtung im Umweltmodell hinterlegt werden, damit über die Postprozessoren die Anweisungen zum Einstellen der jeweiligen Zustände in den Anwenderprogrammen abgelegt werden können. Dadurch wird automatisch sichergestellt, dass sich die Spannvorrichtung immer im korrekten Zustand befindet und eine Zugänglichkeit zu der aktuell

## **4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung**

---

zu bearbeitenden Schweißnaht oder Schnittkante vorhanden ist. Diese Zustände werden mit der zugehörigen E/A-Belegung im Umweltmodell hinterlegt, so dass bei der Erstellung des Aufgabenmodells die einzelnen Schweißnähte und Schnittkanten zugeordnet werden können.

Im Vorfeld der Bearbeitung kann über Vorbedingungen gewährleistet werden, dass die Werkstücke in der Spannvorrichtung eingelegt sind und auch richtig fixiert wurden. Nach Abschluss der Bearbeitung können Signale gesetzt werden, um ein Auswerfen der fertigen Werkstücke zu ermöglichen.

### **4.1.1.3 Die Handhabungskinematik**

In einer Fertigungszelle ist die Handhabungskinematik das zentrale Element, da sie zur Grobpositionierung des Laserstrahls relativ zum Werkstück und damit der Scanneroptik eingesetzt wird, welche die anschließende Feinpositionierung durchführt. Zudem kann sie die Steuerung der Fertigungszelle übernehmen, damit nur ein System zu programmieren ist.

Die Ausrichtung der Scanneroptik muss zur Bearbeitung einer Aufgabe parallel zu dessen Oberfläche erfolgen, um eine Fokuspachführung zu vermeiden. Bei komplexen Werkstücken, bei denen die Schnittkanten und Schweißnähte in unterschiedlichen Ebenen liegen, muss die Handhabungskinematik über die nötigen Freiheitsgrade für diese Ausrichtung verfügen. Daher ist die Anzahl der nötigen Freiheitsgrade der Handhabungskinematik durch die Dimension der Aufgabenstellung bestimmt. Der Einsatz eines Industrieroboters bringt eine sehr große Flexibilität in das Gesamtsystem ein, da er mit seinen sechs Achsen die Scanneroptik nahezu beliebig in seinem 3D-Arbeitsraum positionieren kann. Bei 2D-Werkstücken können zur Bearbeitung auch Zwei-Achs-Portalanlagen wie Kreuztische Anwendung finden. In den folgenden Beschreibungen wird ein Industrieroboter als Handhabungskinematik eingesetzt, da sich ein solches System für die Bearbeitung von 2D- und 3D-Werkstücken eignet.

Als Beschreibungsform der Industrieroboter für das Umweltmodell kommen bei dieser Bahnplanungsmethode die DH-Parameter (DENAVIT & HARTENBERG 1955) zum Einsatz. Ein großer Vorteil bei der Verwendung dieser Beschreibungsform ist die Modularität, die dieser

Ansatz bietet. Der Austausch eines Industrieroboters im Umweltmodell besteht nur aus einer Aktualisierung der DH-Parameter. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Roboterhersteller unterschiedliche Konventionen bezüglich des Roboterkoordinatensystems und der Drehrichtung der Achsen haben (vgl. Abbildung 2.15 auf Seite 36).

Neben der mathematischen Beschreibung der Handhabungskinetik werden im Umweltmodell noch Angaben zum Arbeitsraum und der Genauigkeit abgelegt, die experimentell bestimmt werden müssen. In Abbildung 4.4 sind zwei Messprinzipien dargestellt, um Informationen über die Absolut-, die Wiederhol- und die Bahngenauigkeit (a) sowie über das Schwingungsverhalten (b) von der Handhabungskinetik zu erhalten. Bei dem ersten Messprinzip (a) wird ein Laser-Tracker eingesetzt, der mit einem Messlaserstrahl die Bewegung der Handhabungskinetik im Arbeitsraum exakt aufzeichnen kann. In (b) ist ein 3D-Laser-Doppler-Vibrometer dargestellt. Dieses System richtet drei Messlaserstrahlen auf die stillstehende Handhabungskinetik und nimmt über mehrere Messpunkte ein 3D Schwingungsbild auf (ZÄH ET AL. 2010a). Mit Hilfe dieser Daten wird sichergestellt, dass die Handhabungskinetik über eine ausreichende Präzision verfügt, um das RAC (P&S oder fliegend) zu ermöglichen. Die Angabe der maximalen Verfahrensgeschwindigkeit und der Beschleunigung der Handhabungskinetik kann ebenfalls mit dem Messprinzip aus Abbildung 4.4 a verifiziert werden und dient bei der Berechnung der Bahn der Handhabungskinetik als Eingangsparameter.

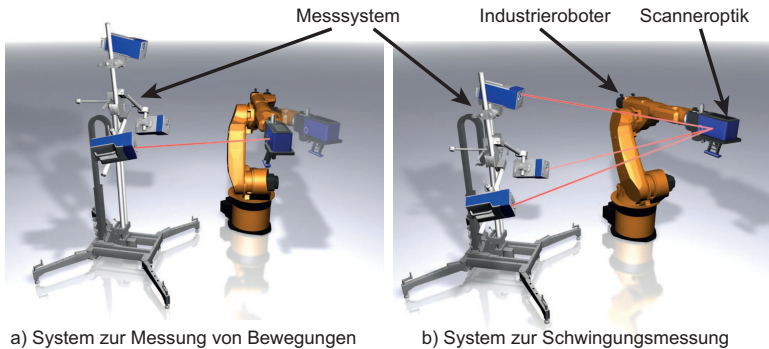


Abbildung 4.4: Messsysteme zur Bestimmung des Schwingungs- und des Bewegungsverhaltens von Handhabungskinetiken

## **4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung**

---

Für jede zu verwendende Handhabungskinematik wird ein Postprozessor benötigt, welcher die im Bahnplanungswerkzeug berechneten Bahnen automatisch in maschinenlesbare Anwenderprogramme überführt. In diesem Anwenderprogramm werden auch die Steuerbefehle für alle Systemkomponenten hinterlegt. Die Komponente Handhabungskinematik übernimmt dazu die E/A-Belegung aus der Fertigungszelle. Dies schließt das Einschalten der Laserstrahlquelle, das Aktivieren der Spannvorrichtung und das Starten des Ablaufprogramms der Scanneroptik mit ein.

### **4.1.1.4 Die Scanneroptik**

Zur lokalen Laserstrahlpositionierung (Feinpositionierung) auf dem Werkstück wird eine Scanneroptik verwendet, damit alle in Kapitel 2 gezeigten Remote-Laserstrahlprozesse realisierbar sind. Die Scanneroptik wird unabhängig von ihrem Hersteller beschrieben, um sie im Bahnplanungswerkzeug verwenden zu können. Zu dieser Beschreibung zählen die Arbeitsfeldgröße, der Arbeitsabstand und die maximal erreichbaren Geschwindigkeiten. Zusätzlich zum Arbeitsabstand werden noch die Werkzeugkoordinaten angegeben, wie sie in der Robotersteuerung abgelegt werden und die E/A-Belegung, damit eine Kommunikation mit der Robotersteuerung möglich ist.

Zur vereinfachten Berücksichtigung vorgegebener Einstrahlwinkel bei den Laserstrahlprozessen und bei den Berechnungen im Planungsmodul wird die maximale Größe des Bearbeitungsfeldes auf einen Kreis reduziert (siehe Abbildung 4.5). Die Zahlenwerte in Abbildung 4.5 entsprechen einer realen Post-Objective-Scanneroptik, die für das RAC ausgelegt ist. Die Vereinfachung des Bearbeitungsfeldes auf einen Kreis kann durchgeführt werden, da in den Randbereichen die Einstrahlwinkel größer als  $20^\circ$  sind und damit bei vielen Anwendungen außerhalb der gültigen Parameter liegen. Sollte die Scanneroptik 3D-fähig sein, wird das Bearbeitungsfeld als Zylinder im Umweltmodell hinterlegt.

Wie bei der Handhabungskinematik muss für jede Scanneroptik ein Postprozessor vorhanden sein, um die berechneten Bahnen in Anwenderprogramme für die Steuerung zu übertragen. Dadurch wird das Programmiersystem unabhängig von zusätzlicher Hardware, wie dies z. B. bei BECKER ET AL. (2008) und VOGL & MUNZERT (2012) der Fall ist.

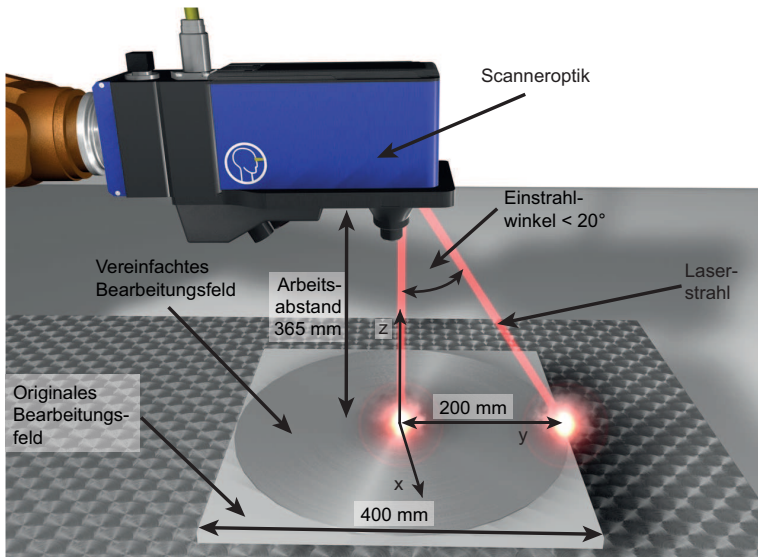


Abbildung 4.5: Definition des Bearbeitungsfeldes einer Scanneroptik, die angegebenen Zahlenwerte sind reale Beispiele, variieren aber je nach Scanneroptik

### 4.1.2 Beschreibung des Aufgabenmodells

Nachdem die Fertigungszelle modelliert ist, werden die Schweiß- und Schneidkonturen, bestehend aus Geometrie- und Prozess-Informationen, des Bauteils in das Programmiersystem eingegeben und in einem Aufgabenmodell nach Abbildung 4.6 abgelegt. Das intuitive Erstellen der Schweiß- oder Schneldaufgaben ist eine zentrale Herausforderung beim Einsatz von Industrierobotern in der Laserstrahlbearbeitung und wurde mit unterschiedlichen Verfahren gelöst (MEYER 2011; VOGL 2009). Bei komplexen Bearbeitungskonturen und kinematisch redundanten Laserstrahl-Positioniersystemen können die Vorteile der aufgabenorientierten Programmierung genutzt werden, da die Bahnplanung nach der Aufgabenerstellung automatisiert erfolgt. Zudem besteht bei dieser Art der Programmierung der Unterschied zwischen Schweißnähten und Schnittkanten nur aus verschiedenen Prozessparametern, weshalb sie im Folgenden nur noch als Aufgabenteile bezeichnet werden.

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

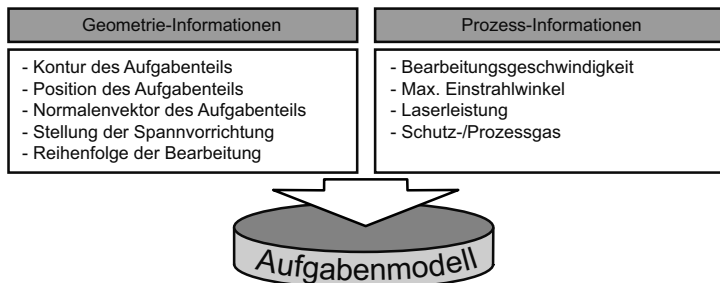


Abbildung 4.6: Beschreibung der Schweißnähte und Schnittkanten in einem Aufgabenmodell

### 4.1.2.1 Geometrie-Informationen

Die Positionen der Konturen der Aufgabenteile in einem Koordinatensystem der Fertigungszelle (vgl. Abbildung 2.15) werden als Geometrie-Informationen in das Programmiersystem eingegeben und in eine Datenstruktur nach Abbildung 4.7 geschrieben. Die Beschreibung der Konturen erfolgt mit diskreten Punkten (BACKES 1997; MUNZERT 2010). Die Struktur in Abbildung 4.7 mit dem Namen *Aufgabe* bietet eine Gliederung der Aufgabenteile in Gruppen mit gleichen Eigenschaften an. Jedem Aufgabenteil wird sowohl eine feste Identifikationsnummer zugeteilt als auch die Position in der Reihenfolge der Bearbeitung, die durch einen Sortieralgorithmus verändert werden kann. Darüber hinaus wird angegeben, ob es sich um eine geschlossene Kontur handelt, ein Parameter der für die Mehrfachbelichtung beim RAC nötig ist. Neben den Geometrie-Informationen müssen für die Datenstruktur noch die Prozess-Informationen eingegeben werden.

Für die meisten Werkstücke stehen heutzutage CAD-Daten zur Verfügung. Dadurch können die Aufgabenteile direkt bei der Konstruktion vorgegeben werden (WECK & BRECHER 2006). Gängige CAD-Programme bieten die Möglichkeit, diese Schweißnähte und Schnittkanten in unterschiedlichen Formaten zu exportieren. Zudem gibt es spezialisierte Programme, welche eine CAD/CAM-Kopplung besitzen und Schnittstellen haben, um neben den geometrischen Informationen auch Prozessparameter zu hinterlegen (ROBOTMASTER 2012; VOGL & MUNZERT 2012).

Eine weitere Möglichkeit, die Geometrie-Informationen einzugeben, wird



## 4.1 Phase 1: Erstellen der Aufgabendefinition

Aufgabe	Bearbeitungszeit Anzahl Aufgabenteile		Geometrie-Informationen Prozess-Informationen	
	Gruppe	Identifikationsnummer	Bearbeitungszeit	
		Reihenfolgenummer	Anzahl Aufgabenteile	
		Normalenvektor		
Aufgabenteil	Aufgabenteil	Identifikationsnummer	Normalenvektor	Bearbeitungs- geschwindigkeit
		Reihenfolgenummer	Geschlossene Kontur	Absetzen/Pausen
		Anzahl Stützpunkte	Wobbel-Frequenz	Fokusedurchmesser
		Spannvorrichtung	Wobbel-Amplitude	Fliegend
Stützpunkt	Stützpunkt	Länge	Einstrahlwinkel <sub>max</sub>	
		Bearbeitungszeit		
		Identifikationsnummer	Laserleistung	
		Reihenfolgenummer	Einstrahlwinkel	
Stützpunkt	Stützpunkt	Koordinatensystem original	$\gamma$ positiv	
		Koordinatensystem Roboter	$\gamma$ negativ	
		Koordinatensystem Simulation	$\beta$ positiv	
			$\beta$ negativ	

Abbildung 4.7: Datenstruktur eines Aufgabenmodells, in Anlehnung an MUNZERT (2010)

in VOGL (2009) mit dem Einsatz von Augmented Reality vorgestellt. Mittels eines Zeigestiftes, dessen Position im Arbeitsraum in Roboterkoordinaten aufgezeichnet wird, können die Konturen direkt am Werkstück für die Aufgabenteile vorgegeben werden. Ein Laserprojektor oberhalb des Werkstücks projiziert die gespeicherten Aufgabenteile auf das Werkstück. Sollte ein zu bearbeitendes Aufgabenteil nicht korrekt auf dem Werkstück liegen, kann es anschließend bei Bedarf verschoben werden.

Das direkte Vormachen der Bewegungen und ein integriertes Aufzeichnen der gezeigten Bahnen stellt eine weitere intuitive Möglichkeit dar, um an die Geometrie-Informationen zu gelangen (MEYER 2011).

Ohne den Einsatz von zusätzlichen Hardware- und Software-Komponenten können die Aufgabenteile mit Hilfe des verwendeten Roboters aufgenommen werden. Dazu wird ein Anwenderprogramm für den Roboter per Teach-In erstellt, welches ihn entlang der zu bearbeitenden Konturen führt. Bei diesem Programm muss weder auf Einstrahlwinkel noch auf die benötigte Bearbeitungsgeschwindigkeit geachtet werden. Das Programm wird anschließend abgefahren und mit einer roboterinternen Aufzeichnungsfunktion werden die Geometrie-Informationen in Roboterkoordinaten gewonnen. Dadurch wird in der automatisierten Bahnplanung der Roboter im Rahmen seiner Wiederholgenauigkeit offline programmiert und ein Nachteachen ist meist nicht erforderlich. Bei einfachen geome-

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

trischen Figuren, wie Linien, Kreise oder Rechtecke, vereinfacht sich die Programmierung sogar, wenn nur Punkte aufgenommen werden, welche die Figur eindeutig bestimmen. Bei einem Kreis zum Beispiel kann der Mittelpunkt mit dem Roboter angefahren oder in der Simulationsumgebung bestimmt werden und unter Berücksichtigung des Radius wird ein mathematisch exakter Kreis als Aufgabe hinterlegt.

### 4.1.2.2 Prozess-Informationen

Die Prozess-Informationen beinhalten alle prozessorientierten Angaben für die Bearbeitung eines Aufgabenteils. Eine Unterscheidung zwischen den Prozessen erfolgt ausschließlich anhand der Werte der Parameter wie sie in Abbildung 4.7 dargestellt sind. Die Prozess-Informationen müssen für jedes Aufgabenteil einzeln vorgegeben werden, wobei zu unterscheiden ist, ob der Parameter für das ganze Aufgabenteil gilt oder für jeden Stützpunkt einzelne Daten vorliegen können. Für die Bahnplanungsalgorithmen sind die Bearbeitungsgeschwindigkeit und die Anzahl der Belichtungen die Hauptparameter, da durch sie die Systemtechnik und die Bearbeitungszeit festgelegt ist. Sie gelten, neben Angaben zum Wobbeln und der Angabe, ob die Kontur ohne Absetzen bearbeitet werden muss, für das gesamte Aufgabenteil. Darüber hinaus können auch für die Spannvorrichtung unterschiedliche Zustände, wie z. B. „Schutzgas einschalten“ oder „Spannelement in Position“, spezifisch für jedes Aufgabenteil vorgegeben werden. Die Laserleistung sollte entlang der Kontur variiert werden können, da ein rampenförmiges Zu- und Abschalten der Emission die Prozessqualität verbessern kann (BECKER ET AL. 2008). Es besteht damit die Möglichkeit, die Streckenenergie entlang der Kontur anzupassen. Die Einstrahlwinkel werden ebenfalls für jeden Stützpunkt einzeln vorgegeben. Zwar gelten die maximal möglichen Einstrahlwinkel  $\pm\gamma_{max}$  und  $\pm\beta_{max}$  für das ganze Aufgabenteil, sollten aber Informationen über die Zugänglichkeit bekannt sein, ist eine Vermeidung von ungewollten Kollisionen des Laserstrahls mit der Spannvorrichtung oder dem Werkstück durch eine Einschränkung bei einigen Stützpunkten erreichbar. Der Parameter „Fliegend“ gibt an, ob das Aufgabenteil mit der P&S-Strategie bearbeitet werden muss oder fliegend bearbeitet werden kann. Neben einer manuellen Eingabe der Prozessparameter lassen sich diese teilweise über Tabellen, wie sie schon in GARNICH (1992) beschrieben sind, automatisch berechnen und nach einer Aufbereitung im Aufgabenmodell ablegen.

### 4.2 Phase 2: Verarbeitung der Aufgabendefinition

Abbildung 4.8 zeigt ein Konzept für ein Planungsmodul mit einer automatisierten Bahnplanungsmethode, die sich in ein Programmiersystem integrieren lässt. Die Bahnplanungsmethode besteht aus fünf Schritten, welche sich in drei Phasen gliedern und setzt im Anschluss an die Erstellung der Aufgabendefinition über die Benutzerschnittstellen an. In der ersten Phase der Bahnplanungsmethode werden die Aufgabe in das passende Datenformat überführt und die Eigenschaften der Aufgabe festgelegt. Ausgehend von den ermittelten Daten werden die minimal benötigten Hardware-Komponenten ausgewählt und die Schweißnähte und Schnittkanten in eine optimierte Reihenfolge gebracht. In der zweiten Phase werden die Bahnen für die Handhabungskinematik und die Scanneroptik automatisiert in einem Bahnplanungswerkzeug berechnet. Abgeschlossen wird die Bahnplanung in der dritten Phase mit dem Überführen der Bahnen in maschinenlesbare Anwenderprogramme. Dann können die Bahnen synchron von den Hardware-Systemen abgefahren werden, um die Bauteile zu fertigen. Die Bahnplanungsmethode wird im folgenden Kapitel detailliert vorgestellt.

### 4.3 Phase 3: Ausgabe der Roboter- und Scannerbahnen

Die fertigen Anwenderprogramme werden in der Regel nach einer erfolgreichen Simulation über eine TCP/IP-Verbindung an die jeweiligen Steuerungen der Hardware-Komponenten übertragen. Anschließend kann mit der Fertigung begonnen werden.

#### 4.3.1 Simulation

Eine Simulation wird in vielen Bereichen eingesetzt, um vorhandene Ergebnisse virtuell abzusichern, bevor sie in der Realität getestet werden (GARNICH 1992; VOGL & MUNZERT 2012). Gerade beim Einsatz von Industrierobotern in einer so begrenzten Umgebung wie einer Laserstrahlfertigungszelle kann durch eine vorangehende Simulation sichergestellt werden, dass alle Arbeitspunkte erreichbar sind, keine Kollisionen erfolgen und genügend Spielraum für die Lichtleitfaser vorhanden ist. Die

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

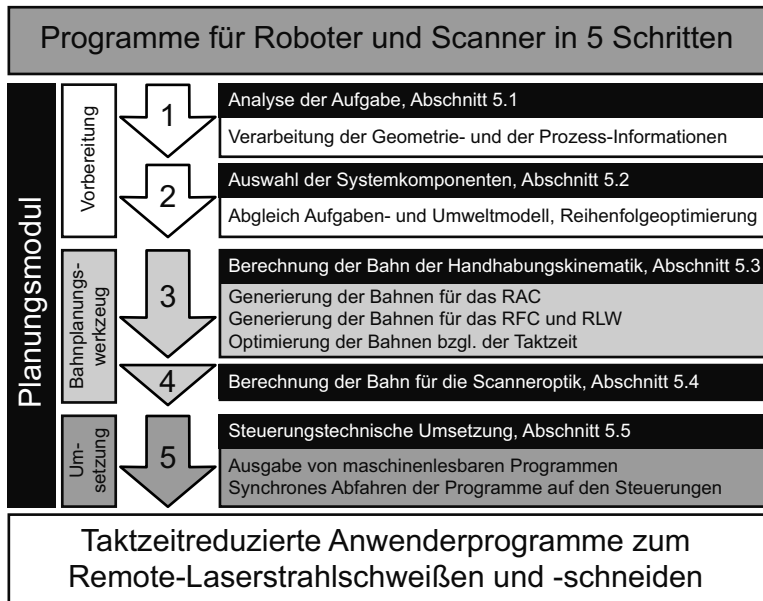


Abbildung 4.8: Konzept für die Bahnplanungsmethode

Simulationsumgebung wird aus den Daten des Umweltmodells erstellt. Die Positionen des Roboters entlang der fertig berechneten Bahnen werden über eine inverse Kinematik in Achswinkel umgerechnet und der Roboter wird dargestellt. Die jeweiligen Auslenkungen der Spiegel der Scanneroptik werden als Bewegungen des Laserstrahls auf dem Bauteil gezeigt. In der Simulation kann dann die Fertigung des Bauteils von allen Seiten begutachtet werden, bevor die berechneten Bahnen an die Komponenten in die Laserstrahlfertigungszelle transferiert werden.

### 4.3.2 Fertigung

Bis zur ersten Fertigung eines Bauteils können noch zwei Zwischenstufen durchgeführt werden, um sicherzugehen, dass beim Übertrag von der Simulation in die Laserstrahlfertigungszelle keine Fehler aufgetreten sind.

Zuerst bietet es sich an, mit eingeschaltetem Pilotlaser<sup>5</sup> die Konturen abzufahren, um zu überprüfen, ob die Programme synchron laufen und die Schweißnähte und Schnittkanten an den dafür vorgesehenen Positionen liegen.

Nachdem alle Vorkehrungen für eine sichere Fertigung getroffen sind, kann als zweites der Prozesslaser mit einer verminderten Leistung auf das Bauteil gelenkt werden, wodurch die Schweißnähte und Schnittkanten nur markiert werden. Erst dies garantiert eine exakte Positionierung des Laserstrahls, da der Pilotlaser eine andere Wellenlänge besitzt und damit in der Scanneroptik geringfügig anders abgelenkt wird. Sollte in dieser Stufe der Laserstrahl falsch platziert werden, wird weder das Bauteil noch die Spannvorrichtung stark beschädigt und nach einer Korrektur der Geometrie-Informationen über das Nachteachen kann der Vorgang wiederholt werden. Liegen die Aufgabenteile an den gewünschten Positionen, kann mit dem Prozesslaser und der vorgegebenen Laserleistung das erste Bauteil gefertigt werden.

#### 4.3.3 Offline-Nachteachen

Da die gesamte Programmierung offline erfolgt, liegen die Schweißnähte und Schnittkanten eventuell nicht exakt an der vorgesehenen Position. In diesem Fall müssen die Anwenderprogramme mittels Nachteachen ausgebessert werden. Beim konventionellen Nachteachen werden die offline programmierten Roboterposen manuell korrigiert, falls die Simulation nicht mit der Realität übereinstimmt. Die falschen Posen werden überschrieben und das verbesserte Anwenderprogramm kann abgefahren werden.

Bei der Kombination des Roboters mit der Scanneroptik ist es nicht mehr ausreichend, die Roboterposen zu verändern, da dadurch die synchrone Bewegung verloren geht. Durch den Einsatz des Offline-Nachteachens (REINHART ET AL. 2009) können auch bei komplexen Systemen die Positionen ausgebessert werden. Dazu werden nicht die Posen verändert, sondern es werden die Geometrie-Informationen im Aufgabenmodell angepasst, siehe Abbildung 4.9. Durch ein erneutes Durchlaufen der au-

---

<sup>5</sup>Ein Pilotlaser ist ein sichtbarer Laserstrahl mit sehr niedriger Leistung, welcher statt dem Prozesslaser von der Laserstrahlquelle emittiert wird.

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

tomatisierten Bahnplanung werden neue Anwenderprogramme für die Systeme generiert. Damit können die Aufgabenteile mit den korrigierten Positionen erneut bearbeitet werden.

Sofern die Positionen passen, aber die eingebrachte Streckenenergie nicht stimmt, kann diese über eine Anpassung der Geschwindigkeit oder der Laserleistung ebenfalls verändert werden. Vor allem bei Anpassungen der Geschwindigkeit müssen wieder neue Anwenderprogramme im Planungsmodul erstellt werden.

Mit Hilfe des Offline-Nachteachens kann erreicht werden, dass die gestellte Aufgabe auch nach dem Übertrag von der Simulation in die Realität richtig bearbeitet werden kann. Auch wenn die Prozessparameter nicht exakt eingegeben wurden, können schnell und präzise Anpassungen vorgenommen werden.

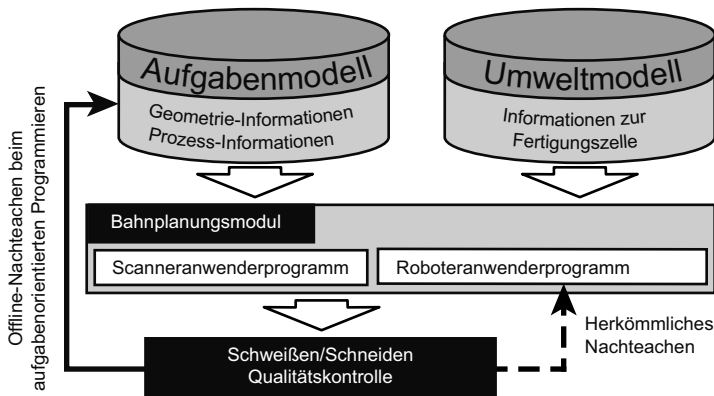


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des Nachteach-Vorgangs;  
Herkömmliches Nachteachen und Offline-Nachteachen

### 4.4 Beispielhafte Versuchsaufgabenstellung

Die Funktionsweise der Bahnplanungsmethode wird in Kapitel 5 anhand eines Versuchsbauteils, das sich für eine Bearbeitung in einer Laserstrahlfertigungszelle eignet, gezeigt. Die Aufgabendefinition, bestehend aus Aufgaben- und Umweltmodell, wird im Folgenden beschrieben, wobei

das Versuchsbauteil eine LKW-Türe ist und die Laserstrahlfertigungszelle aus Abbildung 1.1 auf Seite 3 mit den Komponenten aus Abbildung 2.1 auf Seite 8 Verwendung findet.

Neben der hier gezeigten Fertigungszelle wurden insgesamt drei Industrieroboter und eine Portalkinematik mit zwei Freiheitsgraden sowie drei unterschiedliche Scanneroptiken modelliert und in einer Fertigungszelle getestet, um die Gültigkeit der Bahnplanungsmethode für unterschiedliche Systeme zu zeigen. Zu den vorgegebenen Schweiß- oder Schneidaufgaben können daher die passenden Hardware-Komponenten ausgewählt werden. Eine Erweiterung des Umweltmodells auf z. B. Werkzeugmaschinen mit fünf Freiheitsgraden ist bei der vorgestellten Beschreibungsform durchführbar, sofern eine geeignete Schnittstelle zur Datenübertragung vorhanden ist.

### 4.4.1 Beschreibung eines Versuchsbauteils

Die Fertigung einer LKW-Türe, wie sie in Abbildung 4.10 dargestellt ist, beinhaltet Schnitte, die mit dem RAC eingebracht werden können. Zudem muss eine Schweißnaht entlang der Außenkontur gezogen werden, welche die Größe des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik übersteigt. Damit können bei diesem Versuchsbauteil alle Anforderungen an die Bahnplanung für die Remote-Laserstrahlbearbeitung aufgezeigt werden.

Die LKW-Türe besteht aus zwei Bauteilen, dem inneren Aufbau und der Außenhaut. Sie haben jeweils eine Wandstärke von 0,7 mm. Die Geometrie-Informationen können direkt den CAD-Daten entnommen und in das Planungsmodul eingelesen werden. Die Prozess-Informationen werden manuell dem Aufgabenmodell hinzugefügt. Die Fertigung der LKW-Türe ist ein zweistufiges Verfahren. Zuerst werden die Ausschnitte beim inneren Aufbau eingebracht und in einem zweiten Arbeitsschritt werden die beiden Bauteile im Überlappstoß miteinander verschweißt.

Beim inneren Aufbau sind Ausschnitte auf vier unterschiedlichen Ebenen zu fertigen. Eine Herausforderung bei den Ausschnitten ist das Einbringen des Fensterdurchbruchs, welcher größer als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik ist und damit nicht am Stück ausgeschnitten werden kann. Die Prozessparameter der Ausschnitte bestehen aus einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von 6000 mm/s bei 10 Belichtungen. Anschließend werden die beiden Bauteile mit einer geschlossenen Schweißnaht entlang der

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

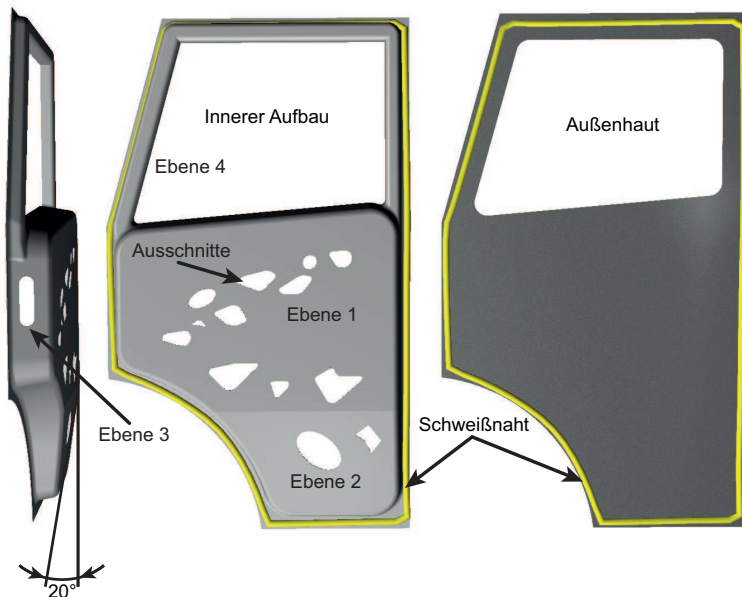


Abbildung 4.10: Versuchsbauteil LKW-Türe mit Ausschnitten und einer umlaufenden Schweißnaht

Außenkontur miteinander verbunden. Um eine qualitativ hochwertige Schweißnaht zu erhalten, ist eine Schweißgeschwindigkeit von 100 mm/s bei einer überlagerten Wobbelbewegung mit einer Amplitude von 0,5 mm bei einer Frequenz von 1000 Hz einzuhalten. Die Laserleistung beträgt bei beiden Prozessen 3 kW und die maximal zulässigen Einstrahlwinkel liegen bei 15°.

### 4.4.2 Beschreibung einer Fertigungszelle

Die Laserstrahlfertigungszelle, die zur Bearbeitung der LKW-Türe verwendet wird, ist in Abbildung 1.1 gezeigt und wird im Folgenden vorgestellt. Für die Versuche wird ein Sechs-Achsen-Vertikal-Knickarm-Roboter mit einer Tragkraft von 60 kg eingesetzt, an dessen Flansch eine Scanneroptik angebracht ist. Der Roboter hat eine maximale Verfahrensgeschwindigkeit von  $v_{Robo,max} = 2000 \text{ mm/s}$ . Die maximale



Verfahrgeschwindigkeit während der Prozesse wurde über Versuche (vgl. Abbildung 4.4) bestimmt und beträgt beim vorgestellten Bauteil  $v_{Robo, Prozess, max} = 200 \text{ mm/s}$ . Bei höheren Geschwindigkeiten sind die Schwingungen des Roboters zu hoch, um die Schnittkante beim RAC wiederholt zu treffen (ZÄH ET AL. 2010a). Die Schwingungen wurden mit einem 3D-Laser-Doppler-Vibrometer in unterschiedlichen Posen und bei geraden Bewegungen gemessen. Zudem spielt der Winkelversatz, während sich der Roboter fortbewegt, eine große Rolle bei der maximalen Verfahrgeschwindigkeit während des Prozesses. Der Laserstrahl trifft aus unterschiedlichen Richtungen auf die gleiche Stelle der Schnittkante. Daher muss mehr Material abgetragen werden, als wenn die Scanneroptik still steht. Nur bis zu einer Geschwindigkeit des Roboters  $v_{Robo, Prozess, max}$ , die vom Material, der Materialdicke, der Anzahl der Belichtungen, den Laserstrahl-Parametern und der Bahngenauigkeit des Roboters abhängig ist, kann die fliegende Bearbeitung eingesetzt werden.

Die Scanneroptik ist auf einen Arbeitsabstand von 365 mm kalibriert und besitzt ein  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  großes Bearbeitungsfeld. Ein in der Steuerung der Scanneroptik hinterlegtes Anwenderprogramm kann über einen digitalen Ausgang des Roboters gestartet werden. Sie ermöglicht Sprunggeschwindigkeiten von  $v_{Scanner, max} = 20\,000 \text{ mm/s}$  und kann den Laserstrahl während des Prozesses mit maximal  $v_{Scanner, Prozess, max} = 10\,000 \text{ mm/s}$  über das Bauteil bewegen. Die von der Scanneroptik erreichbaren Wobelfrequenzen und -amplituden wurden experimentell nach SCHWEIER ET AL. (2011) mit zeitdiskreten Chirp-Signalen bestimmt. Dabei wird einer linearen Bewegung des Laserstrahls durch die Scanneroptik eine Wobbel-Bewegung mit der gewünschten Amplitude überlagert und abschnittsweise die Frequenz erhöht. Je höher die Frequenz eingestellt wird, desto kleiner wird die real erreichte Amplitude. Je nach den Anforderungen an die Qualität der Schweißnähte, müssen hier Grenzwerte definiert werden, bis zu welcher Frequenz die Scanneroptik eingesetzt werden kann.

Als Laserstrahlquelle wird ein Grundmode-Faserlaser mit einer Wellenlänge von  $1,067 \mu\text{m}$  und einer Ausgangsleistung von 3 kW verwendet. Der Laserstrahl wird über die Scanneroptik auf einen Durchmesser von  $50 \mu\text{m}$  fokussiert. Das entspricht einer Strahlintensität im Fokus von  $1,53 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ . Die Laserstrahlquelle wird über den Roboter eingeschaltet und die Emission wird automatisch über die Scanneroptik akti-

## 4 Programmiersystem für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

viert. In Kombination mit der beschriebenen Scanneroptik beträgt die Rayleigh-Länge nach Gleichung (2.7)  $z_R = 1,5$  mm. Als Laserschutzwand wird eine passive Betonwand mit 180 mm Dicke verwendet.

Die Spannvorrichtung verfügt über drei Zustände, die vom Roboter gesetzt werden können. Im offenen Zustand werden die beiden Bauteile eingelegt. Anschließend können die Spannbacken für die äußere Umfangsschweißnaht geschlossen werden. Befindet sich die Spannvorrichtung im dritten Zustand, ist der innere Aufbau für das RAC fixiert. Die Spannvorrichtung meldet jeweils dem Roboter zurück, ob der Zielzustand erreicht ist und ob die Bauteile richtig eingelegt sind.

Mit diesen Angaben stehen alle benötigten Informationen im Umwelt- und im Aufgabenmodell zur Verfügung, damit das Planungsmodul aus Abbildung 4.8 gestartet werden kann.

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

Für das vorgestellte Programmiersystem aus Abbildung 4.1 wird in diesem Kapitel die zugehörige Bahnplanungsmethode aus Abbildung 4.8 beschrieben. Neben einer verbesserten Nutzung der Laserstrahlquelle kann mit Hilfe dieser Bahnplanungsmethode auch das Einhalten von Prozessparametern, wie die Bearbeitungsgeschwindigkeit und die maximalen Einstrahlwinkel, sichergestellt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, bei der Sortierung und der Bearbeitung der Schweißnähte und der Schnittkanten Informationen über den thermischen Verzug zu berücksichtigen (ZÄH ET AL. 2009). Die Bahnplanungsmethode wird an dem Versuchsbauteil aus Abbildung 4.10 und der beschriebenen Laserstrahlfertigungszelle gezeigt. Die Abschnitte in diesem Kapitel sind nach dem Konzept aus Abbildung 4.8 gegliedert.

### 5.1 Schritt 1: Analyse der Aufgabe

Der erste Schritt im Planungsmodul auf dem Weg zur Bearbeitung der Schweiß- und der Schneidaufgaben besteht aus der Analyse der Aufgabenstellung und einer Aufbereitung der Daten für die anschließende Bahnplanung.

#### 5.1.1 Verarbeitung des Aufgabenmodells

Zuerst wird überprüft, welcher Dimension die gesamte Aufgabe zuzuordnen ist. Dazu werden von jedem Aufgabenteil seine zugehörige Ebene im Raum, seine Abmaße und sein geometrischer Mittelpunkt bestimmt. Anhand der Größe und der Dimension der gesamten Aufgabe sowie der Position der Aufgabe relativ zur Handhabungskinematik wird in diesem Schritt sichergestellt, dass die Aufgabe mit der im Umweltmodell be-

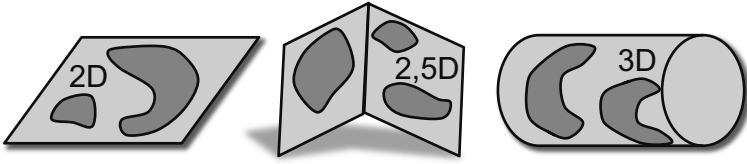
## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

schriebenen Systemtechnik bearbeitet werden kann. Dies hängt von der verwendeten Scanneroptik (2D oder 3D) ab, und davon, ob die Handhabungskinematik die Scanneroptik parallel zur Bearbeitungsebene ausrichten kann. Die möglichen Dimensionen werden in Bezug auf die einzelnen Aufgabenteile und die gesamte Aufgabe nach Abbildung 5.1 definiert.

- Ein 2D-Aufgabenteil liegt vor, wenn sich alle Stützpunkte in einer Ebene befinden, wobei Abweichungen im Bereich der Rayleigh-Länge zulässig sind. Eine 2D-Aufgabe liegt vor, wenn alle Aufgabenteile in einer Ebene liegen und ihre Normalenvektoren in die gleiche Richtung zeigen. Gerade beim Ableiten der Aufgabe aus Roboterposen oder mit anderen Hilfsmitteln werden geringe Abweichungen im Rahmen der Messtoleranz immer vorhanden sein. Zur Berechnung werden zwei parallele Ebenen mit dem Abstand der Rayleigh-Länge, wie sie im Umweltmodell angegeben ist (beim RAC meist  $z_R \approx 1 \text{ mm}$ ), aufgespannt, so dass sich möglichst viele Aufgabenteile darin befinden.
- Setzt sich eine Aufgabe aus mehreren Ebenen zusammen, wird von einer 2,5D-Aufgabe gesprochen. Weiterhin genügt eine 2D-Scanneroptik, um die gesamte Aufgabe bearbeiten zu können, wenn die Handhabungskinematik die passende Ausrichtung realisieren kann.
- Eine 3D-Aufgabe liegt vor, wenn bei einem Aufgabenteil nicht mehr alle Stützpunkte in einer Ebene liegen und damit der Einsatz einer 3D-Scanneroptik für das RAC nötig ist. In diesem Fall muss eine weitere Unterscheidung durchgeführt werden, falls die Handhabungskinematik in der Lage ist, die Fokuspnachführung durchzuführen. Dies ist möglich, wenn die Bearbeitungsgeschwindigkeit kleiner ist, als die maximale Vorschubgeschwindigkeit der Handhabungskinematik, wie beim RLW und RFC. Dann können auch 3D-Aufgaben mit einer 2D-Optik bearbeitet werden.

Anschließend werden alle Aufgabenteile, die in einer Ebene liegen, zu einer Gruppe zusammengefasst. Für jede Gruppe wird der zugehörige Normalenvektor berechnet und im Aufgabenmodell hinterlegt. Alle Aufgabenteile mit einer 3D-Kontur, die aufgrund ihrer Position nicht einer Ebene zugeordnet werden können, werden in eine separate Gruppe verschoben. Eine Klassifizierung der einzelnen Gruppen wird in dem Bahnplanungswerkzeug benötigt. Die gesamte Größe einer Gruppe be-



*Abbildung 5.1: Mögliche Dimensionen von Aufgaben, die aus mehreren Aufgabenteilen zusammengesetzt sind*

stimmt, ob eine lokale Positionierung der Scanneroptik über der Gruppe ausreicht, um alle Aufgabenteile dieser Gruppe zu bearbeiten (P&S-Strategie) oder ob mehrere Positionen angefahren werden müssen und damit ggf. eine fliegende Bewegung bei der Taktzeit Vorteile bietet.

Da selbst hochdynamische Scanneroptiken bei den hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten beim RAC an ihre Leistungsgrenzen kommen (ZÄH ET AL. 2010c) und gewisse Krümmungen nicht mehr bahngetreu abfahren können, wird der Krümmungsverlauf entlang der Konturen jedes Aufgabenteils berechnet. Sollten die im Umweltmodell hinterlegten kritischen Werte der Scanneroptik überschritten werden, wird der Parameter „Fliegend“ im Aufgabenmodell genullt und der Roboter muss anhalten damit das Abfahren der Kontur des Aufgabenteils im Rahmen einer P&S-Strategie alleine durch die Scanneroptik durchgeführt wird. Dies führt in der Regel zu einer höheren Bahntreue, da in den Steuerungen von Scanneroptiken meist Korrekturfunktionen für solche Bahnen implementiert sind. Sofern eine Unstetigkeit, z. B. eine Ecke, erkannt wird, werden die Fahrstrategien aus Abbildung 2.14 in die Bearbeitung des Aufgabenteils integriert (ARGES GMBH 2011).

Die Bearbeitungszeit  $t_{\text{Aufgabenteil},i}$  für jedes Aufgabenteil  $i$  wird nach Gleichung (5.1) berechnet und dient als Eingangsgröße für das Bahnplanungswerkzeug. Sie setzt sich aus der Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Prozess},i}$  sowie der Länge des jeweiligen Aufgabenteils  $l_{\text{Aufgabenteil},i}$  multipliziert mit der Anzahl der Belichtungen  $n_i$  zusammen.

$$t_{\text{Aufgabenteil},i} = \frac{l_{\text{Aufgabenteil},i}}{v_{\text{Prozess},i}} n_i \quad (5.1)$$

Sollte ein einzelnes Aufgabenteil größer als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik sein, wird anhand der Bearbeitungsgeschwindigkeit ent-

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

schieden, ob eine weitere Vorbereitung des Aufgabenteils nötig ist oder ob seine Kontur am Stück bearbeitet werden kann. Bei kleineren Bearbeitungsgeschwindigkeiten als der möglichen Verfahrensgeschwindigkeit der Handhabungskinematik wird die Kontur am Stück bearbeitet. Sollte die Verfahrensgeschwindigkeit allerdings nicht ausreichend sein, ist die einzige Möglichkeit, das Aufgabenteil zu bearbeiten, die Kontur aufzuteilen. Dieses auch als *kacheln* oder *patchen* bezeichnete Verfahren (LÜTKE ET AL. 2009) unterteilt die Kontur in Bereiche, die wiederum von der Scanneroptik bearbeitet werden können. Gerade beim RAC führt dies zu hohen Anforderungen an die Absolutgenauigkeit der Handhabungskinematik, da die sehr kleinen Schnittfugenbreiten von ca.  $150\text{ }\mu\text{m}$  (vgl. Abbildung 2.7) überlappen müssen. Diese Anforderung an die Absolutgenauigkeit wird verringert, wenn nicht die gesamte Aufgabe in Bereiche eingeteilt wird, sondern nur die zu großen Schnitte in viele kleine Schnitte zerlegt werden. Die neuen Aufgabenteile werden über Ersatzbahnen, die vollständig auf dem zu entfernenden Material liegen und dessen Krümmungen abgefahren werden können (siehe Abbildung 5.2), wieder zu geschlossenen Konturen geformt. Durch kurze Überlappungen wird auch bei den geringen Schnittfugenbreiten beim RAC sichergestellt, dass die Kontur komplett ausgeschnitten wird. Die Zerlegung der Aufgabenteile erfolgt automatisch anhand des berechneten Krümmungsverlaufs, damit an Unstetigkeiten zwei Ersatzbahnen eine fliegende Bearbeitung ermöglichen (siehe Abbildung 5.2 links), ohne dass eine Ecke überschliffen werden muss.

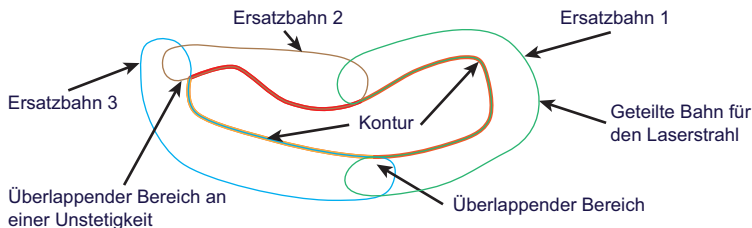


Abbildung 5.2: Anpassen großer Aufgabenteile: Zerlegen der Kontur in mehrere kleine Teilkonturen, so dass die abfahrbaren Krümmungen eingehalten sowie die Ecken vereinfacht werden und alle Teilkonturen fliegend bearbeitet werden können

### 5.1.2 Berechnung der Aufgabenumkreise

Für die untersuchten Aufgabenteile werden als nächstes die möglichen Positionen der Scanneroptik berechnet, von denen aus eine Bearbeitung möglich ist. Da beim RAC das gesamte Aufgabenteil im Bearbeitungsfeld der Scanneroptik sein muss, kann ein Raum identifiziert werden, in dem sich die Scanneroptik für das Ausführen des Prozesses befinden muss. Dieser Raum wird im Folgenden mit  $\Psi$  bezeichnet und zu einem Aufgabenumkreis  $\Psi_K$  vereinfacht (siehe Abbildung 5.3).

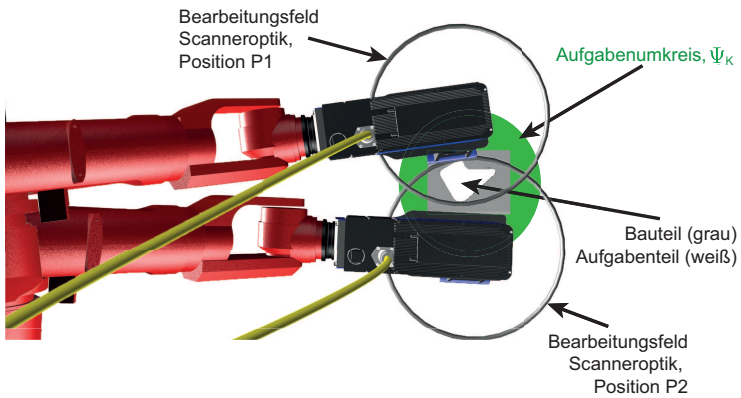


Abbildung 5.3: Darstellung des Aufgabenumkreises für ein Aufgabenteil mit zwei Posen des Roboters innerhalb des Aufgabenumkreises

Ausgehend von der Größe des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik, der Größe des Aufgabenteils und der zugelassenen Einstrahlwinkel aller Stützpunkte kann  $\Psi$  exakt beschrieben werden. Sind Einschränkungen bei den Einstrahlwinkeln gegeben, wird automatisch entschieden, ob die kleinsten Einstrahlwinkel des Aufgabenteils für das Gesamte gelten können. Bei den meisten Aufgabenteilen kann  $\Psi$  als Kreis angenähert werden  $\Psi_K$ , ohne dass große Teile von  $\Psi$  verloren gehen. Dies führt bei den weiteren Schritten zu einer vereinfachten Generierung der Bewegungsbahnen der Handhabungskinematik. Der Einschränkungswert  $\Psi_e$ , der bei solch einer Änderung entsteht, wird nach Gleichung (5.2) als Differenz von  $\Psi$  und  $\Psi_K$  berechnet.

$$\Psi_e = \Psi - \Psi_K \quad (5.2)$$

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

Der Einschränkungswert  $\Psi_e$  ist klein, wenn das Aufgabenteil viel kleiner ist als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik und je mehr die Kontur des Aufgabenteils einem Kreis entspricht. Daraus folgen die beiden Extremwerte, die als Betrag angegeben werden:  $|\Psi_{e,\max}|$  bei einer geraden Linie (siehe Abbildung 5.4) und  $|\Psi_{e,\min}| = 0$  bei einem kreisförmigen Aufgabenteil. Es können dazu Grenzwerte für  $|\Psi_e|$  festgelegt werden. Sobald diese überschritten werden, wird mit  $\Psi$  weitergearbeitet.

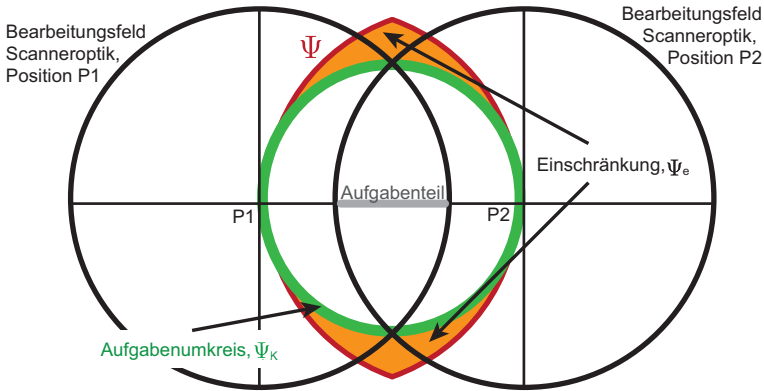


Abbildung 5.4: Darstellung des maximal möglichen Einschränkungswertes  $\Psi_e$  bei einem Aufgabenteil bestehend aus einer Linie

Der Begriff *Nullraum* kann mit den Aufgabenumkreisen in Zusammenhang gesetzt und damit auf die Remote-Laserstrahlbearbeitung erweitert werden. Bei der klassischen Definition des Nullraums (siehe Abschnitt 2.7.2) wird der TCP an einer Position mit der gleichen Orientierung gehalten, während der Roboter eine Nullraumbewegung ausführt. Bei der Laserstrahlbearbeitung muss der TCP dagegen entlang der Aufgabenkontur geführt werden. Solange dies unter Einhaltung der vorgegebenen Prozessparameter geschieht, ist die Bewegung des Roboters unerheblich. Daraus folgt, dass  $\Psi$  den räumlichen Nullraum für die Bewegung des Roboterflansches aufspannt, wobei  $\Psi$  abhängig von der verwendeten Scanneroptik und den Eigenschaften der Aufgabe ist.



### 5.1.3 Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 1

Nachdem die Aufgabe gemessen ist, stehen alle Informationen für die weitere Bearbeitung zur Verfügung und es ist zudem sichergestellt, dass die vorliegende Aufgabe mit der im Umweltmodell vorhandenen Systemtechnik bearbeitet werden kann. Auf Grund der Annahme eines kreisförmigen Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik wurden für die Aufgabenteile ebenfalls Kreise, sogenannte Aufgabenumkreise, definiert, um die Berechnung im Bahnplanungswerkzeug zu vereinfachen. Die Größe dieser Aufgabenumkreise ist abhängig von den Maßen des Aufgabenteils, den zulässigen Einstrahlwinkeln und von der Größe des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik.

Die Ergebnisse nach Durchlaufen des ersten Schritts werden exemplarisch an dem beschriebenen Versuchsbauteil, der LKW-Türe aus Abbildung 4.10, gezeigt. Die gesamte Aufgabe besteht aus 16 Aufgabenteilen, die in 4 Ebenen liegen (siehe Abbildung 4.10). Die errechnete Gesamtprozesszeit beträgt 79,7 s, sie teilt sich auf in 47,3 s für die Schweißnaht bei 100 mm/s und in 32,4 s für die Ausschnitte. Die Schnitte erfolgen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 6000 mm/s, was bei 10 Belichtungen zu einer effektiven Schnittgeschwindigkeit von 600 mm/s führt. In Abbildung 5.5 ist die Ebene 1 zusammen mit den zugehörigen Aufgabenumkreisen und der Aufteilung des Ausschnitts des Fensters in kleine Teilkonturen dargestellt, bei einer Bearbeitungsfeldgröße der Scanneroptik mit einem Radius von 100 mm, um die maximalen Einstrahlwinkel einzuhalten. Damit sind alle Aufgabenteile für den nächsten Bahnplanungsschritt analysiert und verarbeitet.

## 5.2 Schritt 2: Auswahl der Systemkomponenten

Im zweiten Schritt wird ermittelt, welche der im Umweltmodell hinterlegten Komponenten benötigt werden, um die gestellte Aufgabe zu bearbeiten. Das Ziel in diesem Schritt ist die Minimierung der verwendeten Komponenten, um zum einen die Komplexität möglichst gering zu halten. Zum anderen wird die Genauigkeit erhöht, je weniger Achsen während der Bearbeitung in Bewegung sind. In diesem Abschnitt wird zuerst die Nomenklatur der Relativbewegung in der technischen Mechanik auf

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

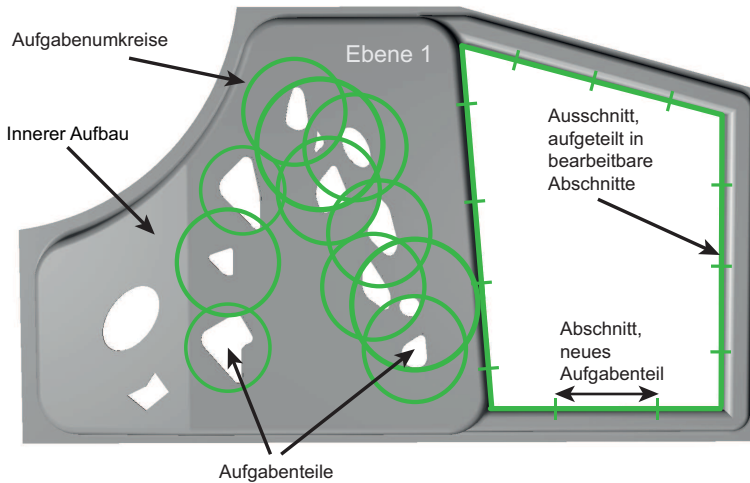


Abbildung 5.5: LKW-Türe nach Schritt 1; mit Aufgabenumkreise der Ebene 1 und aufgeteiltem, großen RAC Schnitt

die vorliegenden Systemkomponenten angepasst und deren Eigenschaften aufgezeigt. Die Auswirkungen der Relativbewegung auf den Prozess wird im Anschluss dargestellt.

### 5.2.1 Relativbewegung zwischen Werkstück und Scanneroptik

Bei dem vorliegenden Ansatz werden zwei separate Systeme gemeinsam genutzt, daher müssen die einzelnen Bewegungen in ihrem Zusammenhang betrachtet werden. Gemäß der Lehre der technischen Mechanik nach HAUGER ET AL. (2002) kann die Bewegung der Handhabungskinematik als Führungsbewegung und die der Scanneroptik als Relativbewegung bezeichnet werden. Die resultierende Bewegung ist die Bewegung des Fokus des Laserstrahls auf dem Werkstück und damit die Absolutbewegung. Sofern das Werkstück zusätzlich bewegt wird, entspricht die Absolutbewegung weiterhin der Bewegung des Laserstrahls auf dem Werkstück. Die Führungsbewegung teilt sich in die Bewegung der Handhabungskinematik sowie in die des Werkstücks auf und stellt damit die

Bewegung der Scanneroptik in Bezug zum Werkstück dar.

Neben der Positionierung des Laserstrahls ist eine definierte Bearbeitungsgeschwindigkeit für eine hohe Prozessqualität erforderlich. Die vektorielle Bearbeitungsgeschwindigkeit  $\bar{v}_{Prozess}$  entspricht der Absolutgeschwindigkeit  $\bar{v}_{Absolut}$  und ist nach Gleichung (5.3) die vektorielle Summe der Führungs- ( $\bar{v}_{Führung} = \bar{v}_{Robo}$ ) und der Relativgeschwindigkeit ( $\bar{v}_{Relativ} = \bar{v}_{Scanner}$ ).

$$\begin{aligned}\bar{v}_{Absolut} &= \bar{v}_{Führung} + \bar{v}_{Relativ} \\ \bar{v}_{Prozess} &= \bar{v}_{Robo} + \bar{v}_{Scanner}\end{aligned}\tag{5.3}$$

Beim RAC werden die Schnittkanten mehrfach belichtet. Daraus folgt, dass bei konstanten Geschwindigkeiten der Handhabungskinematik und der Scanneroptik, wie dies bei der Programmierung üblich ist, die Absolutgeschwindigkeit des Laserstrahls auf dem Werkstück variiert. Die Extremwerte  $v_{Absolut,min}$  und  $v_{Absolut,max}$  werden nach den Gleichungen (5.4) berechnet.

$$\begin{aligned}v_{Absolut,min} &= |\bar{v}_{Relativ}| - |\bar{v}_{Führung}| \\ v_{Absolut,max} &= |\bar{v}_{Relativ}| + |\bar{v}_{Führung}|\end{aligned}\tag{5.4}$$

Werden in die Gleichungen (5.4) die Geschwindigkeiten aus der Aufgabendefinition eingesetzt (Scanneroptik 6000 mm/s, Handhabungskinematik maximal 200 mm/s), folgt eine Varianz der Absolutgeschwindigkeit des Laserstrahls auf dem Bauteil von ungefähr 3,3 %. Das RAC ist robust bei diesen geringen Schwankungen der eingebrachten Streckenenergie. Daher kann im Bahnplanungswerkzeug mit konstanten Geschwindigkeiten der Komponenten gerechnet werden.

Durch die Galvanometerantriebe ist die Beschleunigung der Scanneroptik so hoch, dass die Zeit für das Erreichen der Sollgeschwindigkeit bei den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Laserstrahlprozessen als vernachlässigbar anzusehen ist. Bei der Handhabungskinematik hingegen müssen sehr viel größere Massen auf die Sollgeschwindigkeit beschleunigt werden. Bei Umorientierungen und Richtungswechseln werden große Kräfte aufgewandt, um die einzelnen Achsen auf ihren Geschwindigkeiten zu halten, was zu Abweichungen von der Sollbahn führt.

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

Versuche mit Systemen zur Schwingungsmessung und zur Absolutpositionierung für die fliegende RAC Bearbeitung mit Industrierobotern (siehe Abbildung 4.4) haben gezeigt, dass dieser Prozess nur bei einfachen Roboterbewegungen im Raum durchführbar ist. Der Roboter muss sich auf einer geraden (LIN) Bewegung befinden und eine konstante Geschwindigkeit fahren. Während des Prozesses dürfen die Achsen bei der Fahrt nicht reversieren, das bedeutet, dass jede Achse sich nur in eine Richtung bewegt, damit das Umkehrspiel der Getriebe vernachlässigbar ist. Zudem kann der Prozess nicht bei Beginn der LIN Bewegung starten, da der Roboter durch ein Überschleifen oder Beschleunigen aufgrund seiner Trägheit erst auf der Bahn ausschwingen muss. Mit Hilfe der Messsysteme konnte die sogenannte Ausschwingzeit auf ungefähr 0,2s bei Sechs-Achsen-Vertikal-Knickarm-Robotern mit einer Traglast von 60 kg bestimmt werden nach einer 90° Kurve und einer Geschwindigkeit von 100 mm/s. Diese zusätzlichen Bewegungen werden als Vor- und Nachlauf bezeichnet und sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Nach diesem Ausschwingen befindet sich der Industrieroboter in einem quasistationären Zustand und ist für den Start der Scanneroptik bereit. Ein weiterer Grund für die LIN Bewegungen ist, dass die Scanneroptik nur im internen Takt der Robotersteuerung gestartet werden kann. Dieser liegt derzeit bei modernen Robotersteuerungen bei 1 ms (BECKER ET AL. 2008; BISCHOFF ET AL. 2010) und bei Linear-Kinematiken mit Scannerkoppelung bei 250  $\mu$ s (BARTELS ET AL. 2008). Eine Verschiebung des Starts der Scanneroptik um einen Takt bei Industrierobotern ergibt einen Versatz der Schnittkanten von 0,1 mm bei einer LIN Bewegung mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/s. Bei komplexeren (z. B. Spline-) Bewegungen geht durch die Verschiebung um einen Takt die Synchronizität verloren und RAC Schnitte sind nicht mehr realisierbar.

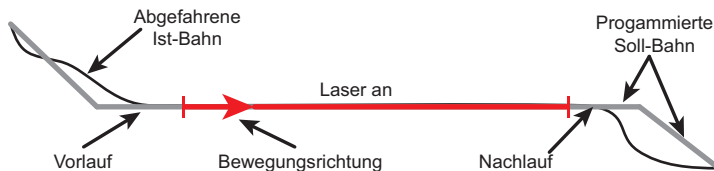


Abbildung 5.6: Vor- und Nachlauf bei LIN Bewegungen mit Überschleifen bei einer Roboterbewegung von links nach rechts

### 5.2.2 Wahl der Handhabungskinematik

Ausgehend von der Größe der Aufgabe und ihrer Dimension können die minimal benötigten Hardware-Komponenten gewählt werden. Dazu werden die Daten aus dem Umweltmodell für eine Bewertung der Komponenten verwendet. Entscheidende Kriterien sind die Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Arbeitsfeldgröße und die Genauigkeit. Bei der Genauigkeit werden bis zu vier Werte berücksichtigt, die Absolut-, die Wiederhol- und die Bahnengenauigkeit sowie das Schwingungsverhalten. Aus diesen Daten und den benötigten Prozessgrößen für die Aufgabe wird eine Auswahl getroffen.

Bei der Bahngestaltung wird zwischen den Transfer- und den Prozessbewegungen unterschieden (WEBER 2002). Für die Prozessbewegungen werden nur die genauesten Systeme verwendet, um eine präzise und nahezu schwingungsfreie Absolutbewegung des Laserstrahlfokus zu gewährleisten. Bei den Transferbewegungen wird die Scanneroptik über dem zu bearbeitenden Aufgabenteil möglichst schnell positioniert. Dies führt zwangsläufig zu einer reinen P&S-Strategie, damit nur die Scanneroptik beim Prozess arbeitet und keine störenden Faktoren, wie Schwingungen, einen negativen Einfluss auf das Prozessergebnis haben. Sofern allerdings die Taktzeit eine wichtige Rolle bei der Bearbeitung spielt, ist in den meisten Fällen eine fliegende Bearbeitung vorzuziehen.

Durch eine Bewertung der einzelnen Systeme des Umweltmodells und eine Gewichtung im Aufgabenmodell, in wieweit die Taktzeit oder die Genauigkeit priorisiert ist, kann im Bahnplanungswerkzeug zwischen den unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien entschieden werden.

### 5.2.3 Reihenfolgeoptimierung

Mit Hilfe eines Algorithmus zur Lösung des Travelling Salesman Problems (TSP) werden die Aufgabenteile in eine initiale Reihenfolge gebracht, um unnötige Roboterbewegungen zu vermeiden. Dazu werden die geometrischen Mittelpunkte aller Aufgabenteile innerhalb der jeweiligen Gruppen zu einem Hamilton-Kreis zusammengefügt, dessen Gesamtlänge anschließend minimiert wird. Hierfür kann auf vorhandene Lösungen des TSP beim RLW zurückgegriffen werden (MUNZERT 2010; STEMMANN 2006), wobei durch die Erweiterung auf Aufgabengruppen

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

auch komplexe Bauteile bearbeitet werden können.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Anpassung der Reihenfolge ist eine Reduzierung des thermischen Verzugs im fertigen Bauteil. Liegen Aufgabenteile nahe beieinander und können von einer Pose aus bearbeitet werden, können sie auf einen möglichst großen Abstand verteilt werden. Durch die hohen verfügbaren Sprunggeschwindigkeiten der Scanneroptik hat eine Vergrößerung des Gesamtweges und damit des Hamilton-Kreises nahezu keinen Einfluss auf die Taktzeit. Sowohl ein größerer Abstand zwischen den Aufgabenteilen als auch ein paralleles Bearbeiten der Schnittkanten beim RAC führt vor allem zu einer gleichmäßigen Einbringung der thermischen Energie und damit zu einer Reduktion von thermischen Verformungen (ZÄH ET AL. 2009). Beim parallelen Bearbeiten werden die Schnittkanten abwechselnd belichtet. Die dadurch entstehenden Pausen bei den einzelnen Schnitten verbessern die Schnittqualität. Alternativ können auch Pausen zwischen den Belichtungen bei einer Schnittkante programmiert werden, dies erhöht jedoch die Taktzeit.

Im Gegensatz zu solchen Gruppierungen können geometrisch isolierte Aufgabenteile auftreten, siehe Ebene 3 der LKW-Türe in Abbildung 4.10, die große Transferbewegungen benötigen. Sie werden so einsortiert, dass sie auf der Verbindungslinie zwischen zwei Gruppierungen liegen, damit eine durchgehende Bewegung der Handhabungskinematik möglich ist oder sie werden als Erstes oder Letztes bearbeitet. Je nachdem wie lange die Ausschwingbewegung ist (siehe Abbildung 5.6), kann in solchen Fällen eine P&S-Strategie in Bezug auf die Taktzeit besser sein. Hier spielt auch die Homeposition der Handhabungskinematik eine große Rolle, um lange Start- und Endbewegungen zu vermeiden. In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie diese Überlegungen zu Anwenderprogrammen für die Handhabungskinematik und die Scanneroptik führen, um eine optimierte Taktzeit, bei möglichst guter Bearbeitungsqualität zu erhalten.

### 5.2.4 Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 2

Die Aufgabenteile werden im zweiten Schritt den passenden Hardware-Komponenten zugeteilt, damit möglichst wenige Achsen während des Prozesses bewegt werden müssen. Zudem wird eine Reihenfolgeoptimierung durchgeführt, die zu einer Verkürzung der Taktzeit beiträgt.

Zur Bearbeitung der LKW-Türe werden alle Freiheitsgrade des verwendeten Industrieroboters benötigt, da sich die Aufgabenteile auf unterschiedlichen Ebenen befinden. Daher werden der Roboter und die Scanneroptik zur Bearbeitung eingesetzt. Des Weiteren werden die Aufgabenteile mit einem TSP Algorithmus ebenenweise in eine optimale Reihenfolge gebracht, siehe Abbildung 5.7 und anschließend werden die jeweiligen Hamilton-Kreise zu einer minimalen Gesamtbahn zusammengesetzt.

Damit ist die erste Phase der Bahnplanungsmethode beendet. In den folgenden zwei Abschnitten wird die zweite Phase erläutert und dabei die Bahnen für die Handhabungskinematik und die Scanneroptik ermittelt.

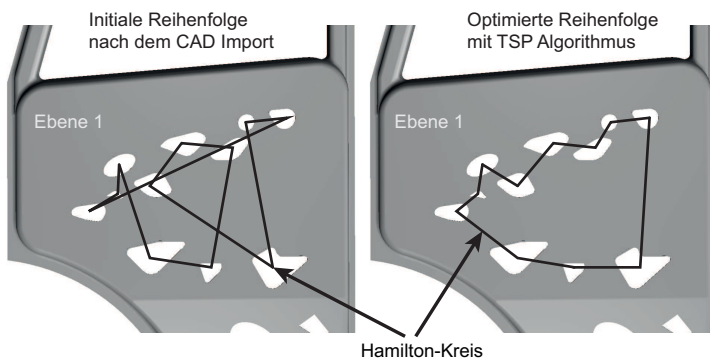


Abbildung 5.7: Sortierung der Aufgabenteile am Beispiel der Ebene 1 der LKW-Türe

### 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik

Die Bahn der Handhabungskinematik stellt die Führungsbewegung dar. Diese Bewegung ist maßgeblich für die Taktzeit der gesamten Aufgabe verantwortlich, da die Transferbewegungen zwischen den Bearbeitungen der einzelnen Aufgabenteile die unproduktiven Nebenzeiten sind. Nur wenn die Scanneroptik mit den schnell verfahrbaren Spiegeln immer die Möglichkeit hat, von einem Aufgabenteil zum nächsten zu springen, kann sie zeitlich optimal eingesetzt werden.

Da als Handhabungskinematik unterschiedliche Systeme wie kartesischen Maschinen und Industrieroboter zum Einsatz kommen, werden bei der Bahnberechnung generische Trajektorien erzeugt. Diese Trajektorien werden anschließend über die zugehörigen Postprozessoren auf die jeweiligen Komponenten übertragen.

Bei diesem dritten Schritt kommen zwei unterschiedliche Methoden zur Anwendung, je nachdem ob die Aufgabenteile kleiner sind als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik oder nicht. Im ersten Schritt (Abschnitt 5.1) wurden zu große Konturen beim RAC passend zerlegt, daher umfasst der folgende Abschnitt „Bahnen beim RAC“ alle Bahnen für das RAC sowie kleine Aufgabenteile beim RFC und RLW (HATWIG ET AL. 2012). Für die Generierung von Bahnen bei großen Aufgabenteilen, deren Bearbeitungsgeschwindigkeit kleiner ist als die Verfahrgeschwindigkeit der Handhabungskinematik, wird in Abschnitt 5.3.2 eine Methode gezeigt, da die Bearbeitung nicht mehr mit einer LIN Bewegung möglich ist.

#### 5.3.1 Bahnen beim RAC

Zur Realisierung des fliegenden RAC wird die Scanneroptik auf geraden Bahnen mit einer konstanten Geschwindigkeit verfahren und befindet sich damit in einem quasistationären Zustand. Diese geraden Bahnen müssen so über dem Werkstück verlaufen, dass möglichst wenige unproduktive Transferbewegungen entstehen. Dazu sind drei Randbedingungen, die sich aus den Prozessen und der Systemtechnik ergeben, einzuhalten. Die erste Randbedingung für diese Bahnen ist, dass sich jedes Aufgabenteil ausreichend lange im Bearbeitungsfeld der Scanneroptik befinden muss, damit es bearbeitet werden kann, siehe Gleichung (5.5).



$$t_{\text{Scanner}, i \in \text{Aufgabenumkreis}, i} \geq t_{\text{Aufgabenteil}, i} \quad (5.5)$$

Die zweite Randbedingung ist das parallele Ausrichten der Scanneroptik zum Werkstück unter exakter Einhaltung deren Arbeitsabstands. Dies führt dazu, dass das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik in der Ebene des Werkstücks liegt. Diese Position im Aufgabenumkreis wird über den Normalenvektor der jeweiligen Aufgabengruppe bzw. des Aufgabenteils und den Werkzeuginformationen der Scanneroptik berechnet. Damit wird die Bearbeitung der Aufgaben auf eine 2D-Bahnplanung für die Handhabungskinetik reduziert, wenn die Berechnung der einzelnen Geraden für jede Aufgabengruppe separat erfolgt. Die berechnete Gerade in der Ebene der Aufgabengruppe muss im Anschluss nur noch in die Koordinaten der Handhabungskinetik umgerechnet werden. Durch die Berücksichtigung des Vor- und des Nachlaufs (siehe Abbildung 5.6), ist die dritte Randbedingung der Bahnplanung, möglichst wenig gerade Abschnitte zu berechnen, um alle Aufgabenteile zu bearbeiten.

Die Berechnung der kürzesten Bahn unter Einhaltung der Randbedingungen erfolgt mit einem vierstufigen Verfahren (siehe Abbildung 5.8). Durch eine Vorwärtsplanung werden die Richtung, die Anzahl und das frühestmögliche Ende der geraden Bahnen bestimmt. Eine anschließende Rückwärtsplanung für jede einzelne Bahn führt zu deren spätest möglichem Anfang. Durch eine Verschiebung der Bahn entlang der x-Achse und einer Geschwindigkeitsanpassung wird die Roboterbewegung und damit die Taktzeit minimiert.

#### 5.3.1.1 Vorwärtsplanung

Der Ablauf der Vorwärtsplanung ist in Abbildung 5.9 gezeigt. Durch ein iteratives Vorgehen werden die Richtungen und die Anzahl der geraden Bahnen berechnet. Dabei wird von jeder Bahn das frühestmögliche Ende der Bewegung für die Handhabungskinetik bestimmt.

Je nach Anordnung der Aufgabenstellung wird mit dem Aufgabenteil begonnen, welches am exponiertesten oder am nächsten zur Homeposition der Handhabungskinetik liegt, wie es durch die Reihenfolgeoptimierung vorgegeben ist. Für eine vereinfachte Berechnung der Bahnen wird die derzeit zu bearbeitende Aufgabengruppe so gedreht, dass die aktuelle gerade Linie in Richtung der y-Achse zeigt. Das Ziel der Vorwärts-

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

### 4-stufiges Vorgehen bei Bahnen beim RAC

Randbedingungen:

- 1.)  $t_{\text{Scanner},i} \in \text{Aufgabenkreis}_i > t_{\text{Aufgabenteil},i}$
- 2.) Bearbeitungsfeld Scanneroptik || Aufgabenteil
- 3.) Minimierung der Anzahl der geraden Bahnen

#### 1. Vorwärtsplanung

Berechnung

- der Richtungen,
- der Anzahl und
- des frühest möglichen Endes der geraden Bahnen

#### 2. Rückwärtsplanung

Berechnung des spätest möglichen Beginns der geraden Bahnen

#### 3. Längenoptimierung

Berechnung der kürzesten Bahn der Handhabungskinematik

#### 4. Geschwindigkeitsoptimierung

Maximierung der Geschwindigkeit  
Berücksichtigung des Vor- und des Nachlaufs

Abbildung 5.8: Vorgehen bei den Bahnen beim RAC

planung ist dann, dass die gerade Bewegung bei einem möglichst kleinen  $y$ -Wert endet. Die Initial-Gerade wird in Richtung von der Mitte des ersten Aufgabenteils zur Mitte des zweiten angenommen, siehe Abbildung 5.10 links.

Die Strecke, welche die Handhabungskinematik während der Bearbeitung eines Aufgabenteils zurücklegt, setzt sich nach Gleichung (5.6) aus der Bearbeitungsdauer  $t_{\text{Aufgabenteil},i}$  des Aufgabenteils  $i$  und der Geschwindigkeit der Handhabungskinematik  $v_{\text{Robo},j}$  bei der Bahn  $j$  zusammen.

$$l_{\text{Laser},ji} = v_{\text{Robo},j} \cdot t_{\text{Aufgabenteil},i} \quad (5.6)$$

Zu Beginn der Vorwärtsplanung wird die Handhabungskinematik sehr langsam mit 1 mm/s verfahren, damit alle möglichen Aufgabenteile berücksichtigt werden. Die Geschwindigkeit wird in der vierten Stufe maximiert. Die Richtung der Bahn wird iterativ bestimmt. Dazu wird die Richtung vom 1. zum 2. Aufgabenteil  $\xi$  bestimmt und die Aufgabengruppe in 1°-Schritten von  $\xi - 90^\circ$  bis  $\xi + 90^\circ$  gedreht. Bei jeder Richtung

### 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik

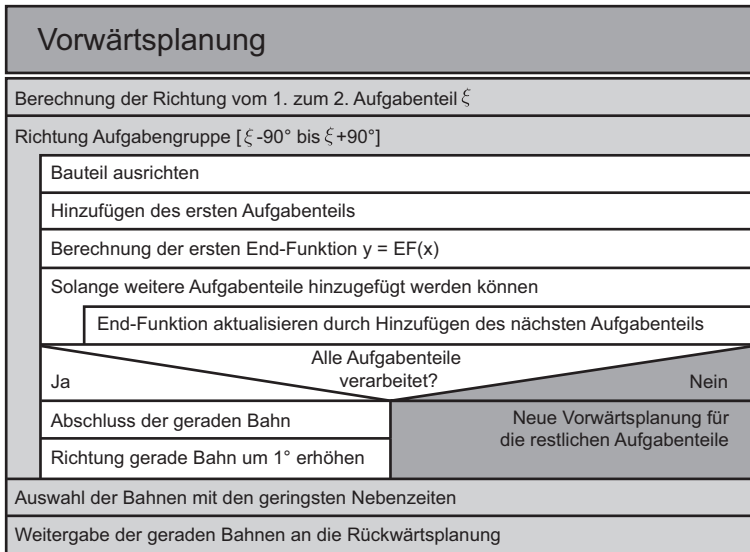


Abbildung 5.9: Vorgehen bei der Vorwärtsplanung

werden mit der Vorwärtsplanung möglichst viele Aufgabenteile auf der geraden Bewegung bearbeitet. Sobald bei der geraden Bewegung bei einer Richtung keine weiteren Aufgabenteile hinzugefügt werden können (siehe Abbildung 5.10 links ab dem 5. Aufgabenteil), wird für die verbliebenen Aufgabenteile eine neue Bahn begonnen. Durch die Reihenfolgeoptimierung im zweiten Schritt wird dabei sichergestellt, dass keine Bahnüberschneidungen vorhanden sind. Am Ende der Vorwärtsplanung wird die Richtung mit den geringsten Nebenzeiten für die weitere Verarbeitung verwendet. Die fertig gedrehte Aufgabengruppe für die erste gerade Bahn ist in Abbildung 5.10 rechts dargestellt.

Sollte nur ein Aufgabenteil einer Bahn zugewiesen werden, wird als einzige Richtung ein möglichst kurzer Weg zwischen der vorherigen Geraden und der Nachfolgenden gewählt, so dass das Aufgabenteil bearbeitet werden kann und dabei möglichst wenig Prozessnebenzeit entsteht. Dazu wird eine gerade Verbindung zwischen der vorigen und der nachfolgenden Bahn gezogen.

Die Vorwärtsplanung wird im folgenden vorgestellt, wobei die Bewe-

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

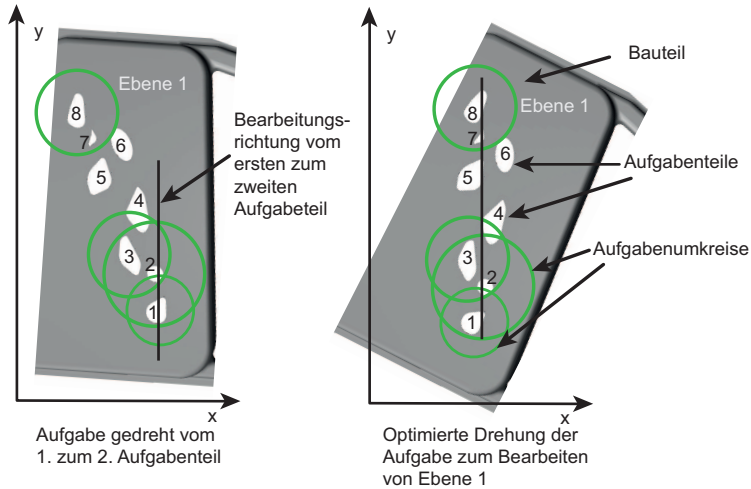


Abbildung 5.10: Drehung des Koordinatensystems der Aufgabe damit möglichst viele Aufgabenteile auf einer Geraden liegen

gungsrichtung in Abbildung 5.11 schon die beste Lösung (nach Abbildung 5.10 rechts) darstellt, da alle Aufgabenteile der ersten Ebene erreichbar sind. Beginnend bei der x-Achse wird die Aufgabe in positiver y-Richtung abgefahren. Die Bearbeitung wird so früh wie möglich begonnen, das bedeutet, sobald die Scanneroptik mit der Mitte ihres Bearbeitungsfeldes den Aufgabenumkreis des ersten Aufgabenteils ( $AK_1$ ) erreicht hat. Damit ist die Bearbeitung des ersten Aufgabenteils beendet, wenn der erste Kreisbogen ( $KB_1$ ) erreicht ist. Der Abstand zwischen  $AK_1$  und  $KB_1$  beträgt nach Gleichung (5.6)  $l_{\text{Laser},j1}$ . Das jeweils mögliche Ende der Bahnen wird als End-Funktion ( $y = EF(x)$ ) bezeichnet, welche von x abhängig ist. Die mögliche Verschiebung in x-Richtung hängt nach der Verarbeitung des ersten Aufgabenteils ausschließlich von der Größe des zugehörigen Aufgabenumkreises ( $AK_1$ ) ab und  $EF(x)$  ist ein Kreisabschnitt.

Die Bearbeitung des zweiten Aufgabenteils kann frühestens mit Erreichen von  $AK_2$  beginnen, allerdings erst, nachdem die Bearbeitung des vorigen Aufgabenteils abgeschlossen ist. Damit hängt der zweite Kreisbogen  $KB_2$  von  $AK_2$  und  $KB_1$  ab. Allgemein können die Kreisbögen  $KB_i$  nach Gleichung (5.8) berechnet werden, wobei  $UAK$  die untere Hälfte

### 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik

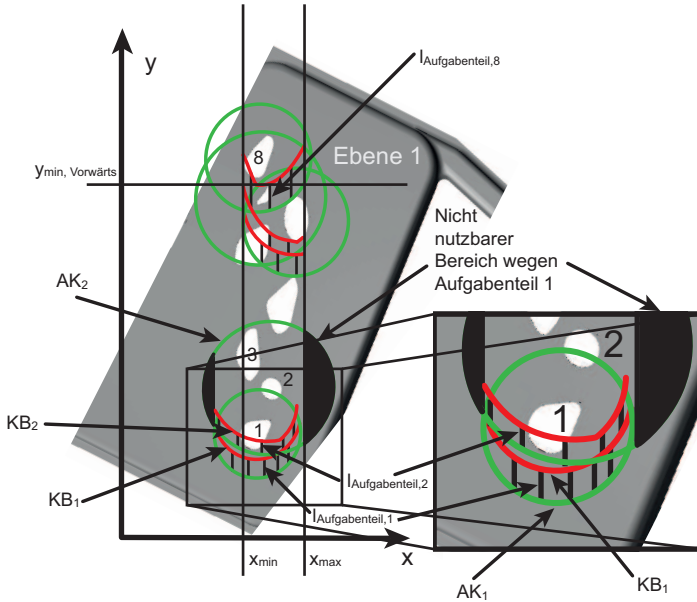


Abbildung 5.11: Vorwärtsplanung für die Bahnberechnung

te des Aufgabenumkreises ist und  $OAK$  die obere Hälfte. Damit die Bahnberechnung des ersten Aufgabenteils bei der Programmierung keinen Sonderfall darstellt, wurde ein virtueller Aufgabenumkreis ( $AK_0$ ) eingeführt, bei dem  $KB = -\infty$  gilt.

$$KB_i^{Temp} = \max(KB_{i-1} + l_{Laser,ji}; UAK_i + l_{Laser,ji}) \quad (5.7)$$

$$KB_i = \begin{cases} KB_i^{Temp}, & \text{if } KB_i^{Temp} < OAK_i \\ \text{Undefiniert}, & \text{else} \end{cases} \quad (5.8)$$

Die End-Funktion ist nach Gleichung (5.9) immer der letzte zulässige Kreisbogen, der durch die möglichen Verschiebungen zwischen  $x_{min}$  und  $x_{max}$  begrenzt ist.

$$EF(x) = KB_{max}, \quad x \in (x_{min}, x_{max}) \quad (5.9)$$

5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

Wird bei der Berechnung der kürzesten Bahn ein großes Aufgabenteil als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik als nächstes identifiziert, wird die Gerade abgeschlossen, das große Aufgabenteil nach der Methode in Abschnitt 5.3.2 bearbeitet und mit den folgenden Aufgabenteilen fortgefahren.

Nachdem die Richtung und das frühest mögliche Ende der geraden Bahn feststeht, wird über eine Rückwärtsplanung der spätest mögliche Startpunkt berechnet.

5.3.1.2 Rückwärtsplanung

Das Vorgehen der Rückwärtsplanung ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Jede in der vorigen Stufe bestimmte Bahn wird im Rahmen der Rückwärtsplanung um 180° gedreht. Die beschriebene Methode der Vorwärtsplanung wird für die Bahnen in der entgegengesetzten Reihenfolge der Aufgabenteile wieder durchlaufen (siehe Abbildung 5.13). Es wird mit dem letzten Aufgabenteil der Geraden von der Vorwärtsplanung begonnen. Daraus folgt, dass die Start-Funktion ( $y = SF(x)$ ) äquivalent zur End-Funktion  $y = EF(x)$  bestimmt wird. Das Ergebnis der Rückwärtsplanung ist der spätest mögliche Beginn der Bahn der Handhabungskinematik.

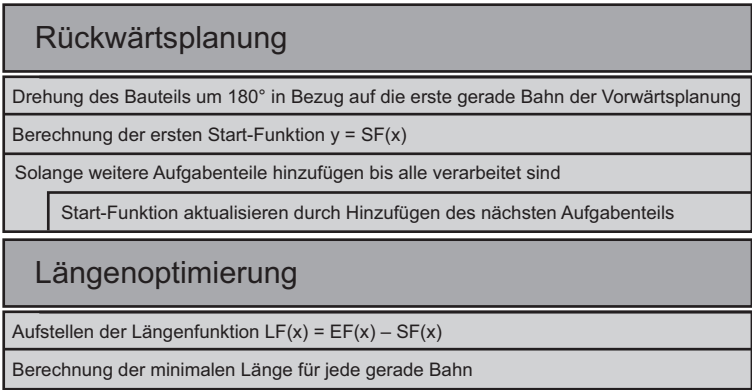


Abbildung 5.12: Vorgehen bei der Rückwärtsplanung und der Längenoptimierung

### 5.3.1.3 Längenoptimierung

$$LF(x) = EF(x) - SF(x), \quad x \in [x_{min}, x_{max}] \quad (5.10)$$

97

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

5.14). Nachdem die Richtung und die Länge der geraden Bahn feststeht, werden die Nebenzeiten noch über eine Erhöhung der Geschwindigkeit verkürzt.

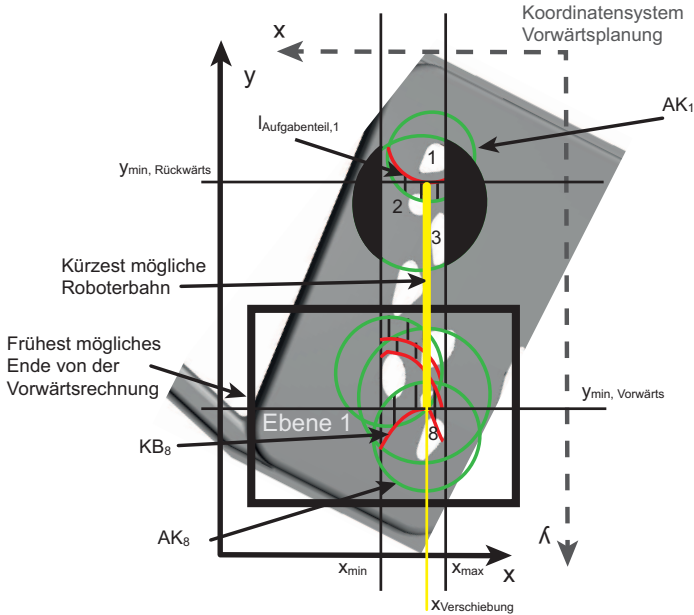


Abbildung 5.14: Längenoptimierung zur Ermittlung der kürzesten Roboterbahn

### 5.3.1.4 Geschwindigkeitsoptimierung

Die Geschwindigkeit der Handhabungskinematik wird iterativ so weit erhöht, dass entweder die vorgegebene Höchstgeschwindigkeit erreicht oder die Geschwindigkeit durch die Anzahl der zu bearbeitenden Aufgabenteile begrenzt ist (siehe Abbildung 5.15). Dieser Vorgang wird mehrfach durchlaufen, da nach jeder Erhöhung der Geschwindigkeit sich  $l_{Laser,ji}$  (Gleichung (5.6)) verkürzt und damit andere Kreisbögen entstehen.

Bei den bisherigen Berechnungen wurde noch nicht berücksichtigt, dass der Abstand zwischen Aufgabenteilen, welche auf einer geraden Bahn



### 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinetik

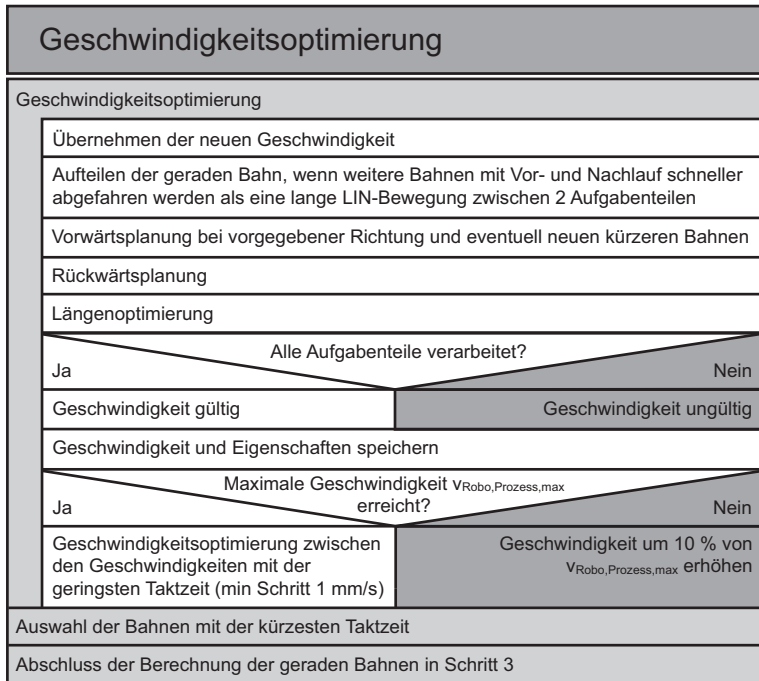


Abbildung 5.15: Vorgehen bei der Geschwindigkeitsoptimierung

liegen, sehr groß sein kann. Dies würde zu einer hohen Nebenzeit führen, wenn sich die Handhabungskinetik auf dieser Bahn mit der berechneten Geschwindigkeit bewegt. In diesem Fall bietet es sich an, die Bahn aufzuteilen und das lange Verbindungsstück mit einer schnellen Transferbewegung zu überbrücken. Dazu wird bei jedem Versatz überprüft, ob eine Transferbewegung inkl. Vor- und Nachlauf schneller ist, als die gesamte gerade Bahn mit der Geschwindigkeit  $v_{Robo, Prozess}$  entlang zu fahren.

Nachdem die geraden Bewegungen fest stehen, wird die Ausschwingzeit als Vorlauf am Anfang und der Nachlauf am Ende der Strecke hinzugefügt. Die fertige gerade Bahn mit den Prozessabschnitten ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

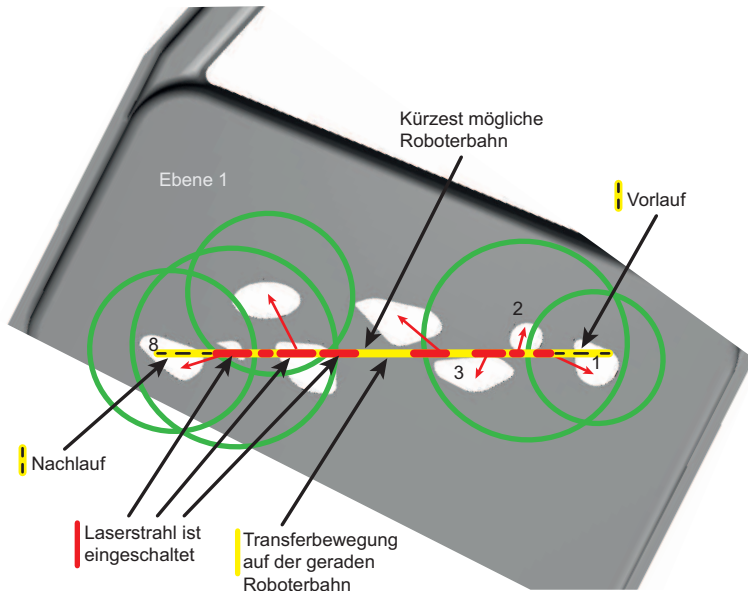


Abbildung 5.16: Berechnete gerade Roboterbahn über der Ebene 1 mit den jeweiligen Prozessabschnitten

### 5.3.1.5 Finalisierung der Bahn der Handhabungskinematik

Nach Abschluss aller Berechnungen werden die Bahnen wieder in die originalen Koordinaten der Aufgabe zurück gedreht. An dieser Stelle werden aus den zweidimensional geplanten Bahnen, unter Berücksichtigung der Fokusslänge der gewählten Scanneroptik, 3D-Bewegungen für die jeweilige Handhabungskinematik.

### 5.3.1.6 Anpassung der Bahnen auf 3D-Aufgabenteile

Besteht ein Aufgabenteil aus einer 3D-Kontur, kann die Scanneroptik nicht parallel zur Oberfläche geführt werden. Sofern eine Post-Objectiv-Scanneroptik verwendet wird und die Fokussnachführung ausreicht, um das gesamte Aufgabenteil im Fokus zu erreichen, ist eine Bearbeitung

## 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik

---

trotzdem möglich. Dies wurde schon bei der Analyse in Schritt 1 sichergestellt. Die Scanneroptik wird dann auf einer Bahn geführt, die orthogonal zum Normalenvektor des Aufgabenteils liegt. Damit ist auch die Bahnplanung für 3D-Aufgabenteile auf ein 2D-Problem zurückgeführt und die Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik erfolgt mit Hilfe des vorgestellten Algorithmus nach Abbildung 5.8. Der Arbeitsabstand wird bei der Finalisierung der Bahn so gelegt, dass die Fokussachführung im Rahmen der Möglichkeiten der Scanneroptik liegt. Die 3D-Informationen des Aufgabenteils wurden nicht verändert und werden im vierten Schritt verwendet, um die zugehörige Fokussachführung zu berechnen.

### 5.3.2 Bahnen beim RFC und RLW

Sofern die Aufgabenteile beim RFC und beim RLW kleiner als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik sind, werden diese gleich wie RAC-Schnitte behandelt. Eine Bahn für die Handhabungskinematik wird dann nach der Methode im vorherigen Abschnitt generiert. Im Gegensatz zu großen RAC Schnitten können beim RFC und RLW auch Aufgabenteile am Stück bearbeitet werden, welche die Abmessungen des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik überschreiten. Dies ist an die Bedingung geknüpft, dass die Geschwindigkeit der Handhabungskinematik  $v_{Robo}$  größer ist, als die nötige Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_{Prozess,i}$  eines Aufgabenteils, siehe Gleichung (5.11).

$$v_{Robo} > v_{Prozess,i} \quad (5.11)$$

Falls die Handhabungskinematik in der Lage ist, die benötigten Geschwindigkeiten für das RAC bei einer ausreichend hohen Genauigkeit zu erreichen, sind auch große RAC-Schnitte ohne abzusetzen realisierbar.

Die beiden Randbedingungen für die Bahnen beim RAC, dass die gesamte Kontur eines Aufgabenteils ausreichend lange in der Reichweite der Scanneroptik gehalten werden muss, Gleichung (5.5), und ein paralleles Ausrichten der Scanneroptik zum Werkstück, gelten weiterhin. Die erste Randbedingung wird allerdings dahingehend verändert, dass die zu bearbeitenden Abschnitte der Kontur sich in Reichweite befinden, Gleichung (5.12). Es ist nicht mehr nötig, dass das komplette Aufgabenteil im Bearbeitungsfeld der Scanneroptik liegt.

$$t_{Scanner \in Teilkontur,i} \geq t_{Aufgabenteil, Teilkontur,i} \quad (5.12)$$

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

Eine weitere, neue Randbedingung ist, dass sich die Spiegel der Scanneroptik permanent mit einer Mindestgeschwindigkeit bewegen sollen, um eine lokale Erhitzung der Spiegel und des F-Theta-Objektivs bzw. des Schutzglases zu vermeiden. Dazu ist stets ein vektorieller Unterschied zwischen der Robotergeschwindigkeit  $\bar{v}_{Robo}$  und der Bearbeitungsgeschwindigkeit des Aufgabenteils  $\bar{v}_{Prozess,i}$  vorhanden.

Die Bahnberechnung setzt sich aus vier aufeinander folgenden Stufen zusammen, die iterativ zur Optimierung der gesamten Bahn durchlaufen werden (siehe Abbildung 5.17):

1. Zuerst wird die Kontur des Aufgabenteils durch eine Skalierung verkleinert.
2. Danach wird die verkleinerte Kontur mit einem Tiefpassfilter geglättet und
3. durch eine Linearisierung wird eine einfache Roboterbahn mit geraden Abschnitten ausgegeben.
4. Abschließend werden die Geschwindigkeiten für die einzelnen Bahnabschnitte berechnet.

Zuvor wird jedoch das Aufgabenteil gedreht, so dass der zugehörige Normalenvektor in positiver z-Richtung des Weltkoordinatensystems zeigt. Nach erfolgter Bahnberechnung stellt eine Rücktransformation sicher, dass die reale Bearbeitung möglich ist. Dies vereinfacht die folgenden Schritte, da die Problemstellung wieder auf eine 2D-Bearbeitung zurück geführt wird.

### 5.3.2.1 Skalierung

Die Handhabungskinematik muss nicht der Kontur des Aufgabenteils exakt folgen, da die hochfrequenten Bewegungen von der Scanneroptik ausgeführt werden können. Um dies zu erreichen, wird die Bahn der Handhabungskinematik mit einer Skalierung verkürzt. Die Skalierung führt mit den folgenden Überlegungen je nach Aufgabenstellung auch zu reduzierten Nebenzeiten. Der Skalierungsfaktor  $\tau$  ist direkt abhängig von der Bearbeitungsfeldgröße der Scanneroptik und den zugelassenen Einstrahlwinkeln des Aufgabenteils, damit alle Bearbeitungspunkte mit der Scanneroptik erreicht werden können.

### 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinetik

Vorgehen bei Bahnen beim RFC und RLW	
Transformation des Aufgabenteils für eine 2D-Bearbeitung	
Minimierung von $\eta$	
1.) Skalierung (Skalierungsfaktor)	
2.) Tiefpassfilterung (Filterordnung, Grenzfrequenz)	
3.) Bahninterpolation (maximale Teilbahnlänge)	
4.) Geschwindigkeitsberechnung	
Variation der Parameter für Skalierung, Filterung und Bahninterpolation	
Rücktransformation in den realen Raum	
Ausgabe der Bahn mittels Postprozessor als Anwenderprogramm	
Abfahren und Aufzeichnen der Bahn mit der Handhabungskinetik	
Geschwindigkeitsberechnung zum Abgleich der Realität mit der Simulation	
Abschluss der Berechnung der Bahnen in Schritt 3	

Abbildung 5.17: Algorithmus zur Bahnplanung beim RLW und RFC

Durch die Skalierung werden alle Bearbeitungspunkte in Richtung des geometrischen Mittelpunktes ( $M$ ) des Aufgabenteils gezogen. Sie erfolgt nach der Rechenvorschrift aus Gleichung (5.13) und ist in Abbildung 5.18 anhand der Schweißnaht der LKW-Türe dargestellt.

$$\begin{aligned}x_p^* &= \tau(x_p - x_M) + x_M \\ y_p^* &= \tau(y_p - y_M) + y_M\end{aligned}\quad (5.13)$$

Um eine Bearbeitung aller Abschnitte der Kontur sicherzustellen, darf die skalierte Kontur maximal einen Abstand, welcher dem Radius des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik entspricht, haben, siehe Gleichung (5.14).

$$|x_p - x_p^*|, |y_p - y_p^*| < \text{Radius des Bearbeitungsfeldes} \quad (5.14)$$

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

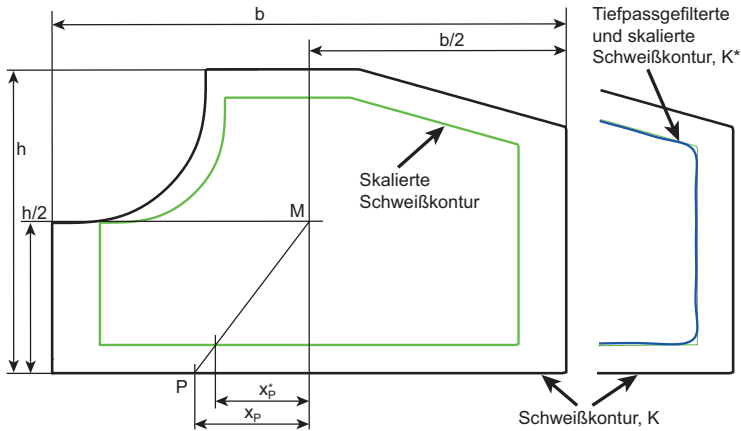


Abbildung 5.18: Links: Skalierung der Außenkontur der LKW-Türe, mit seiner Breite  $b$ , seiner Höhe  $h$  und seines geometrischen Mittelpunktes  $M$ ; rechts: Zusätzliche Tiefpassfilterung

### 5.3.2.2 Filterung mittels Tiefpass

Für eine Vereinfachung der skalierten Kontur wird sie mittels eines Tiefpassfilters geglättet. Da nur eine qualitative Filterung durchgeführt wird, können verschiedene Tiefpassfilter an dieser Stelle verwendet werden. In dieser Arbeit wird ein Butterworth-Filter genutzt. Beim Butterworth-Filter kann die Stärke der Glättung der Bahn über zwei Parameter, die Filter-Ordnung und die Grenzfrequenz, eingestellt werden. Sie werden über die iterative Bahnoptimierung angepasst (siehe Abbildung 5.17), so dass immer noch alle Punkte der Kontur erreichbar bleiben. Über eine doppelte Filterung der Kontur, einmal in Vorwärts- und einmal in Rückwärtsrichtung, kann die Phasenverschiebung, die bei Filterungen zwangsläufig entstehen, kompensiert werden (ROBERTSON & DOWLING 2003). Dies geschieht, indem die Kontur zuerst in ihre  $x$ - und ihre  $y$ -Komponenten aufgeteilt wird. Dann werden diese Signale mit Standard-Funktionen gefiltert. Anschließend werden die getrennten Komponenten wieder zu einer Kontur zusammengesetzt.

Damit steht die Kontur der LKW-Türe verkleinert und geglättet (siehe Abbildung 5.18 rechts) zur Verfügung, die im Folgenden mit  $K^*$  bezeichnet wird.

### 5.3.2.3 Bahninterpolation

Der Startpunkt der Bahn der Handhabungskinematik ist durch die Bahnberechnungen für die vorigen Aufgabenteile festgelegt oder durch die Homeposition, falls es das erste Aufgabenteil ist. Somit ist der optimale Startpunkt für die Bearbeitung der großen Kontur der geometrisch nächste Punkt zum Ende der vorgelagerten Bahn, von dem aus die Kontur erreichbar ist (siehe Abbildung 5.19). Dieser Punkt wird festgehalten und mit  $K^*$  verbunden. Der Endpunkt der geraden Strecke wird solange entlang  $K^*$  geführt, wie die Kontur von der Scanneroptik aus erreichbar ist, unter Einhaltung der vorgegebenen Einstrahlwinkel. Sobald eine weitere Bearbeitung von der geraden Strecke und damit vom ersten Bahnabschnitt (gelbe Linie) aus nicht mehr möglich ist, wird diese beendet und es wird eine neue Strecke entlang  $K^*$  gestartet. Alternativ wird der Bahnabschnitt beendet, wenn die vorgegebene maximale Länge der Bahnabschnitte erreicht ist. Dieses Vorgehen wird entlang der gesamten Kontur weitergeführt, bis für den letzten Bahnabschnitt  $K^*$  verlassen wird und damit sich die Handhabungskinematik schon während der Bearbeitung in die Richtung des nachfolgenden Aufgabenteils bewegen kann, um die Transferbewegung zu reduzieren.

Damit steht eine Bahn für die Handhabungskinematik zur Verfügung, die sich aus fünf geraden Bahnabschnitten zusammengesetzt (siehe Abbildung 5.19).

### 5.3.2.4 Geschwindigkeitsberechnung

Für jeden berechneten Bahnabschnitt mit der Länge  $l_{Robo,Bahnabschnitt,i}$  gibt es den zugehörigen Abschnitt auf der Kontur, dessen Bearbeitungsdauer durch die Länge  $l_{Teilkontur,i}$  und die Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_{Prozess}$  festgelegt ist. Die Handhabungskinematik muss den zugehörigen Abschnitt in der selben Zeit abfahren. Daher wird die Geschwindigkeit der Handhabungskinematik  $v_{Robo,Bahnabschnitt,i}$  nach Gleichung (5.15) berechnet.

$$v_{Robo,Bahnabschnitt,i} = v_{Prozess} \cdot \frac{l_{Robo,Bahnabschnitt,i}}{l_{Teilkontur,i}} \quad (5.15)$$

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

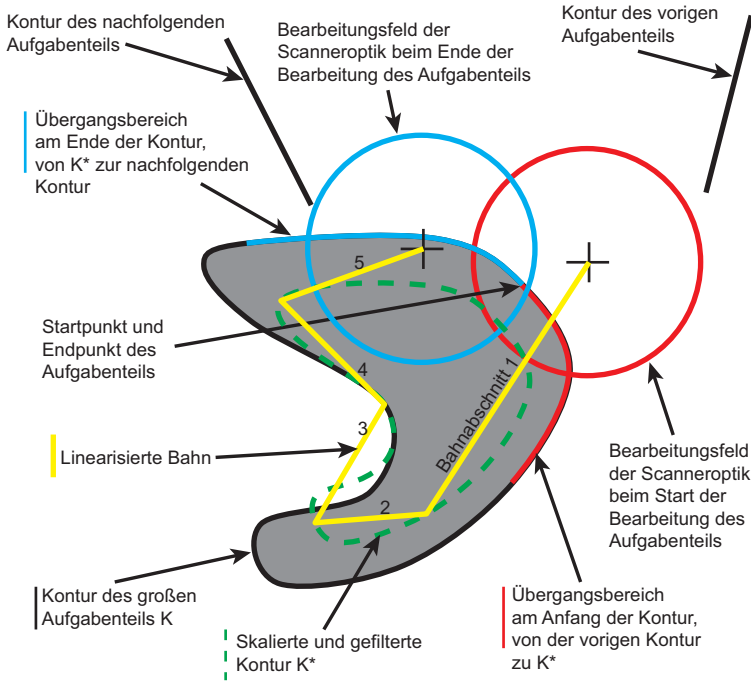


Abbildung 5.19: Geometrische Ermittlung des Start- und des Endpunktes für die Bearbeitung einer Kontur eines Aufgabenteils, das größer ist als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik

### 5.3.2.5 Iterative Bahnoptimierung

Die beschriebenen Parameter (Skalierungsfaktor, Filter-Ordnung, Grenzfrequenz und maximale Länge der Bahnabschnitte) werden über eine iterative Optimierung angepasst, damit eine möglichst kurze und glatte Bahn für die Handhabungskinematik ausgegeben wird. Die Optimierungskriterien sind dabei die Winkel zwischen den Bahnabschnitten sowie die Summe der Längen aller Bahnabschnitte  $l_{Robo,gesamt}$  nach Gleichung (5.16).

$$l_{Robo,gesamt} = \sum_i l_{Robo,Bahnabschnitt,i} \quad (5.16)$$



### 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik

Spitze Winkel führen zu starken Umorientierungen bei den Achsen von Industrierobotern, daher werden die Winkel auf ein Maximum hin verbessert (siehe Abbildung 5.20). Das Vermeiden von spitzen Winkeln wird durch eine Verkürzung der maximalen Länge der Bahnabschnitte erreicht. Zur Reduzierung der Geschwindigkeit der Handhabungskinematik, und folglich zu einer erhöhten Nutzung der Scanneroptik, wird die Summe der Bahnabschnitte möglichst kurz gehalten.

Die beschriebenen vier Stufen der Skalierung, Tiefpassfilterung, Geschwindigkeitsberechnung und Bahninterpolation werden iterativ durchlaufen (siehe Abbildung 5.17), um über Variationen der Parameter den kleinsten Winkel  $\delta$  zu vergrößern und  $l_{Robo,gesamt}$  zu verkleinern. Zur Optimierung werden beide Kriterien miteinander kombiniert, wozu  $\delta$  ins Verhältnis zu  $180^\circ$  und  $l_{Robo,gesamt}$  zur Gesamtlänge des Aufgabenteils  $l_{Aufgabenteil}$  gesetzt werden, um deren Wertebereiche auf das Intervall  $[0; 1]$  zu begrenzen. Das Ziel der Optimierung ist nach Gleichung (5.17) die Minimierung der Summe beider Kriterien  $\eta$ .

$$\eta_{optimiert} = \min \left( \frac{180^\circ - \delta}{180^\circ} + \frac{l_{Robo,gesamt}}{l_{Aufgabenteil}} \right) \quad (5.17)$$

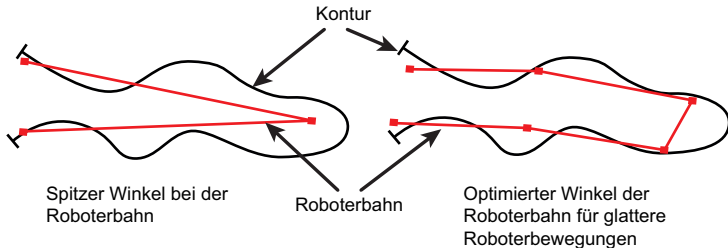


Abbildung 5.20: Optimierung der Roboterbewegung, um große Richtungsänderungen zu vermeiden

#### 5.3.2.6 Anpassung der Bahnen auf 3D-Aufgabenteile

Im Gegensatz zu der 3D-Bahnplanung bei RAC Aufgabenteilen kann beim RFC und beim RLW die Fokussachführung durch die Handhabungskinematik realisiert werden. Damit können auch 2D-Pre-Objective-

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

Scanneroptiken eingesetzt werden, um 3D-Aufgabenteile zu bearbeiten.

Die Skalierung und die Tiefpassfilterung erfolgen wieder nur für die x- und die y-Richtung, womit die z-Informationen für die Höhenanpassung erhalten bleiben. Die Orientierung der Scanneroptik wird entlang des Normalenvektors des Aufgabenteils gehalten. Verläuft die Kontur mit so großen Winkeländerungen, dass die erlaubten Einstrahlwinkel überschritten werden, erfolgt eine Umorientierung. Bei solchen Aufgabenteilen wird die Orientierung immer parallel zu dem Abschnitt, welcher gerade bearbeitet wird, der Kontur gehalten. Eine Anpassung der Orientierung erfolgt kontinuierlich, um schnelle und ruckartige Roboterbewegungen zu vermeiden.

Damit können wiederum die beschriebenen Bahnplanungsmethoden eingesetzt werden, die für ein 2D-Aufgabenteil vorgestellt wurden.

### 5.3.2.7 Abgleich mit der realen Bahn

Nachdem die geraden Bahnen über das große Aufgabenteil berechnet wurden, muss die offline berechnete Bahn an die Realität angeglichen werden. Dies ist nötig, da die einzelnen Bahnabschnitte durch roboterspezifische Überschiefbewegungen miteinander verbunden werden, wie bei Scanneroptiken (vgl. Abbildung 2.14 a). Damit die passende Bahn für die Scanneroptik berechnet werden kann, muss die reale Bahn der Handhabungskinematik bekannt sein. Bei Industrierobotern kann diese über eine interne Bahnaufzeichnungsfunktion aufgenommen werden. Alternativ stehen externe Systeme zur Verfügung, um die Koordinaten der realen Bahn aufzunehmen (vgl. Abbildung 4.4). Sofern der Roboter über eine Spline-Bewegung verfahren werden kann, ist es möglich die Bahn für den Roboter weiter zu glätten, siehe Abbildung 5.21.

Um die Bahn aufzuzeichnen werden die vorab berechneten Punkte über einen Postprozessor in ein Anwenderprogramm für den eingesetzten Roboter ausgegeben und abgefahren. Die aufgezeichnete Bahn wird anschließend wieder in das Bahnplanungswerkzeug eingelesen und im nächsten Schritt für die Berechnung der Bahn für die Scanneroptik verwendet. Dieses Vorgehen ist auch bei anderen roboterbasierten Scanneranwendungen im Einsatz (BRUHM ET AL. 2010; VOGL & MUNZERT 2012). Zuvor muss bei der realen Bahn die Erreichbarkeit aller Punkte der Kon-

### 5.3 Schritt 3: Berechnung der Bahn der Handhabungskinematik

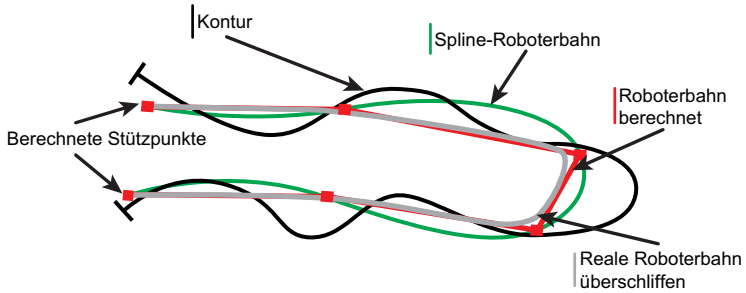


Abbildung 5.21: Unterschied von der berechneten Roboterbahn zur real überschliffenen und zur Spline-Roboterbahn

tur gewährleistet werden. Da zudem die Längen der realen und der berechneten Bahn nicht exakt übereinstimmen, kann durch ein erneutes Durchlaufen der Geschwindigkeitsberechnung mit der aufgezeichneten Bahn der Abgleich zwischen Simulation und Realität hergestellt werden. Weicht die neu berechnete Geschwindigkeit der Handhabungskinematik um mehr als 5 % von der zuvor abgefahrenen ab, ist eine erkennbare Verschlechterung der Qualität der Prozesse zu erwarten und die Bahn muss erneut aufgezeichnet werden. Da nach der zweiten Aufzeichnung die realen Bahndaten mit den berechneten Geschwindigkeiten zur Verfügung stehen, ist dieser dritte Schritt bei der Bahnplanung abgeschlossen.

#### 5.3.3 Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 3

Die Taktzeit wird maßgeblich über die Transferbewegungen der Handhabungskinematik bestimmt. In diesem dritten Schritt wird je eine Methode zur Berechnung für die geraden Bahnen beim RAC und von angepassten Bahnen beim RLW gezeigt. Dabei wird ein Vorgehen beschrieben, um bei den geraden Bahnen möglichst kurze Abstände zwischen den Bearbeitungen der Aufgabenteile zu haben, um unnötige Prozessnebenzeiten zu vermeiden. Die Bahnen für große RLW Aufgabenteile werden offline generiert, so dass der Anfangs- und der Endpunkt möglichst nahe beim vorhergehenden bzw. beim folgenden Aufgabenteil liegen.

In Abbildung 5.22 ist die berechnete und linearisierte Roboterbahn zur

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

---

Bearbeitung der Schweißnaht zusammen mit einer Spline-Roboterbahn, welcher die gleichen Stützpunkte hinterlegt sind, dargestellt. Mit den geraden Roboterbahnen für die RAC Schnitte stehen alle benötigten Roboterbahnen zur Verfügung, um die LKW-Türe zu fertigen.

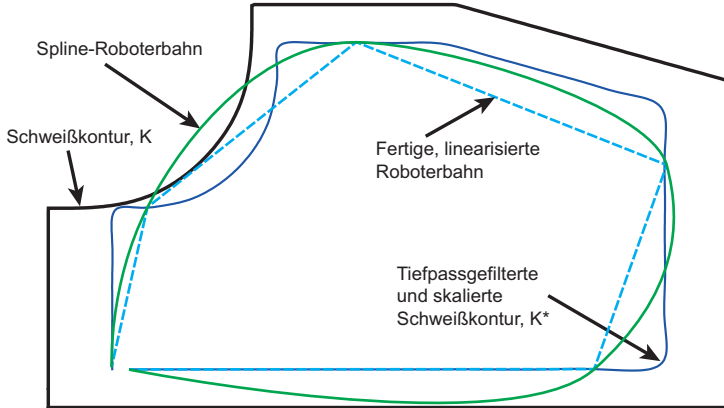


Abbildung 5.22: Berechnete Roboterbahn zur Bearbeitung der großen, umlaufenden Schweißnaht der LKW-Türe

### 5.4 Schritt 4: Berechnung der Bahnen für die Scanneroptik

Die Bewegung für die Handhabungskinematik, die Führungsbewegung, steht jetzt für die weiteren Berechnungen zur Verfügung. Ausgehend von der Führungsbewegung wird in diesem Abschnitt beschrieben, wie die Bewegung des Laserstrahls durch die Scanneroptik realisiert wird, damit die Absolutbewegung des Laserstrahls auf dem Bauteil den Konturen der jeweiligen Aufgabenteile folgt. Sofern es möglich ist, den Laserstrahl mit variabler Geschwindigkeit zu bewegen, ist die anstehende Berechnung eine einfache geometrische Transformation (Gleichung (5.18)), da der Scanner parallel zum Bauteil geführt wird.

$$\overline{Position}_{Scanner} = \overline{Position}_{Roboter} - \overline{Position}_{Aufgabenteil} \quad (5.18)$$

## 5.4 Schritt 4: Berechnung der Bahnen für die Scanneroptik

Der optimale Geschwindigkeitsverlauf für die Scanneroptik kann durch Umformen von Gleichung (5.3) zu Gleichung (5.19) bestimmt werden.

$$\bar{v}_{Scanner} = \bar{v}_{Prozess} - \bar{v}_{Robo} \quad (5.19)$$

Da eine solche freie Führung des Laserstrahls nicht von allen Scanneroptiken unterstützt wird oder Sonderanfertigungen bedingt, wird im Folgenden gezeigt, wie die Scannerbahnen für das RAC und das RLW berechnet werden, ohne dass eine kontinuierliche Geschwindigkeitsanpassung durch die Scanneroptik nötig ist.

### 5.4.1 Scannerbahn für das RAC

Aufgrund des großen Geschwindigkeitsunterschieds zwischen der Führungs- und der Relativbewegung beim RAC und der Robustheit des Prozesses gegenüber geringen Schwankungen der eingebrachten Streckenenergie kann die einfache geometrische Bahnberechnung nach Gleichung (5.18) unter Vernachlässigung von Gleichung (5.19) für die Bahnberechnung der Scanneroptik angewandt werden. Beim Ausschnitt eines Kreises mit 15 Belichtungen entsteht z. B. die einfache geometrische Figur, wie sie in Abbildung 5.23 dargestellt ist.

Durch diese Bahnführung und bei konstanten Geschwindigkeiten der Handhabungskinematik und der Scanneroptik entsteht ein sinusförmiges Geschwindigkeitsprofil auf dem Bauteil (siehe Abbildung 5.24).

Bei 3D-Aufgabenteilen muss zusätzlich noch der Fokus in der Scanneroptik nachgeführt werden. Diese z-Werte können durch die vorgestellte Berechnung ebenfalls ausgegeben werden.

### 5.4.2 Scannerbahn für das RFC und RLW

Die Bearbeitungsgeschwindigkeit liegt beim RFC und beim RLW in der Größenordnung der Geschwindigkeit der Handhabungskinematik. Daher kann der Laserstrahl von der Scanneroptik aus nicht mit einer konstanten Geschwindigkeit geführt werden. Bei einer kreisförmigen Schweißnaht, wie sie in Abbildung 5.23 gezeigt ist, würde eine nach Gleichung (5.18) berechnete Bahn, zu einer Bearbeitungsgeschwindigkeit führen, die um mehr als 50 % vom Sollwert abweicht. Im Folgenden wird eine Me-

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

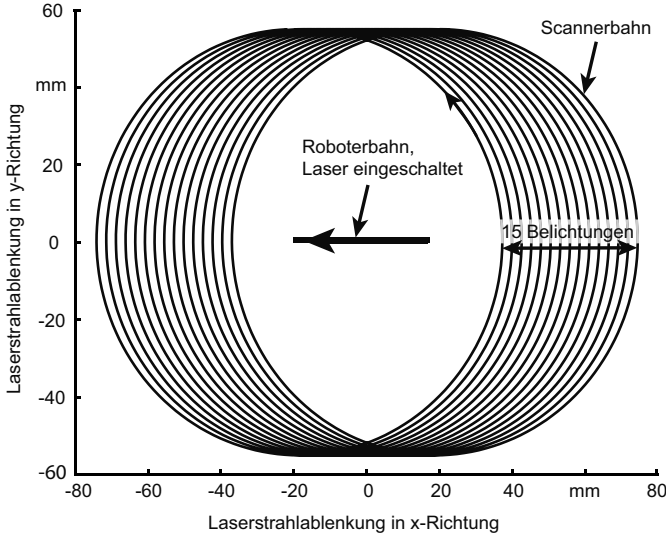


Abbildung 5.23: Resultierende Bahn für die Scanneroptik, beim Ausschnitt eines Kreises mit dem Radius 25 mm bei  $v_{Robo} = 100 \text{ mm/s}$ ,  $v_{Scanner} = 6000 \text{ mm/s}$  und 15 Belichtungen

thode vorgestellt, wie der Laserstrahl mit einer limitierten Anzahl an einstellbaren Geschwindigkeitsniveaus über das Bauteil bewegt und die Bearbeitungsgeschwindigkeit nahezu konstant gehalten werden kann.

Ist es nicht möglich, den optimalen Geschwindigkeitsverlauf aus Gleichung (5.19) mit der Scanneroptik abzufahren, muss der Geschwindigkeitsverlauf in diskrete Stufen quantisiert werden. Es bestehen dabei zwei Möglichkeiten, diese Stufen zu erzeugen. Zum einen können feste, gleichmäßig verteilte Stufen gewählt werden, welche von der niedrigsten benötigten Geschwindigkeit bis zur Höchsten reichen. Alternativ können die Stufen mit dem von SABIN & GRAY (1986) vorgestellten Lloyds-Algorithmus passend zum Geschwindigkeitsverlauf anhand einer Minimierung der Fehlerquadrate nach Gleichung (5.20) berechnet werden.

$$cb_{optimal} = \min_{Codebooks} \left( \sum_j \left( \min_{Stufen} (v_{Verlauf,j} - v_{Stufe,j}) \right)^2 \right) \quad (5.20)$$

## 5.4 Schritt 4: Berechnung der Bahnen für die Scanneroptik

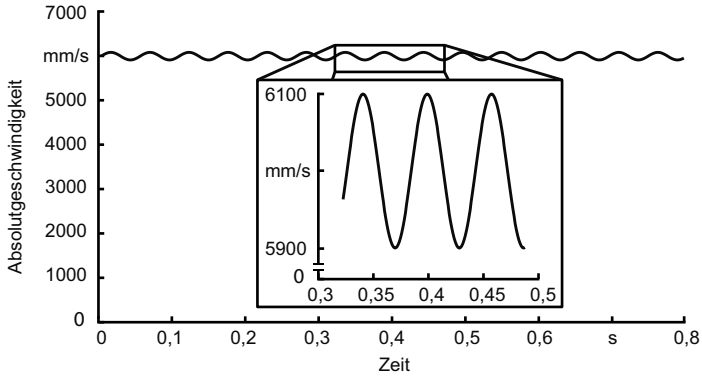


Abbildung 5.24: Geschwindigkeitsverlauf des Laserstrahls entlang der Schnittkante  $v_{\text{Prozess}}$ , wenn die resultierende Bahn für die Scanneroptik aus Abbildung 5.23 in Kombination mit dem Roboter abgefahren wird

Dies wird für alle Zeitschritte  $j$ , die im Geschwindigkeitsverlauf hinterlegt sind, durchgeführt. Als Ergebnis dieser Optimierung stehen die Stufen im Codebook (cb) zusammengefasst für die weitere Verwendung zur Verfügung. Die maximale Anzahl an möglichen Stufen kann vorgegeben werden, um auch Systeme verwenden zu können, die nur eine begrenzte Anzahl an Geschwindigkeiten verarbeiten können.

Bei beiden Quantisierungsmethoden entstehen Fehler in der Bearbeitungszeit eines Aufgabenteils, da sich die Bearbeitungsgeschwindigkeit immer um den Sollwert bewegt und diesen nur selten exakt trifft. Ein Vergleich zwischen  $t_{\text{Aufgabenteil},i}$  nach Gleichung (5.1) und  $t_{\text{Aufgabenteil},i,\text{quant}}$  unter Verwendung der Quantisierungsmethoden zeigt einen Unterschied von nur wenigen Millisekunden, wobei bei festen Stufen eine höhere Abweichung auftritt. Die Qualität der Prozesse wird durch solch kleine Abweichungen von der eingebrachten Streckenenergie nicht beeinflusst. Abbildung 5.25 zeigt den Unterschied des Geschwindigkeitsverlaufs von beiden Methoden mit wenigen (je sieben) Stufen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Stufen, die mit dem Lloyds-Algorithmus berechnet wurden, genauer dem Verlauf folgen. Da die Bearbeitungsgeschwindigkeit beim RLW und beim RFC in der Regel kleiner als 200 mm/s sind, liegen die Geschwindigkeitsstufen nur wenige mm/s aus-

## 5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung

einander. Moderne Scanneroptiken verfügen über eine ausreichend hohe Beschleunigung, dass diese Sprünge in der Geschwindigkeit vernachlässigbar schnell durchgeführt werden können. Diese beiden Fehler führen beim RLW und RFC zu keinen erkennbaren Beeinträchtigungen an der Qualität der Prozesse, da dies zu Änderungen der eingebrachten Streckenenergie um wenige Prozent führt.

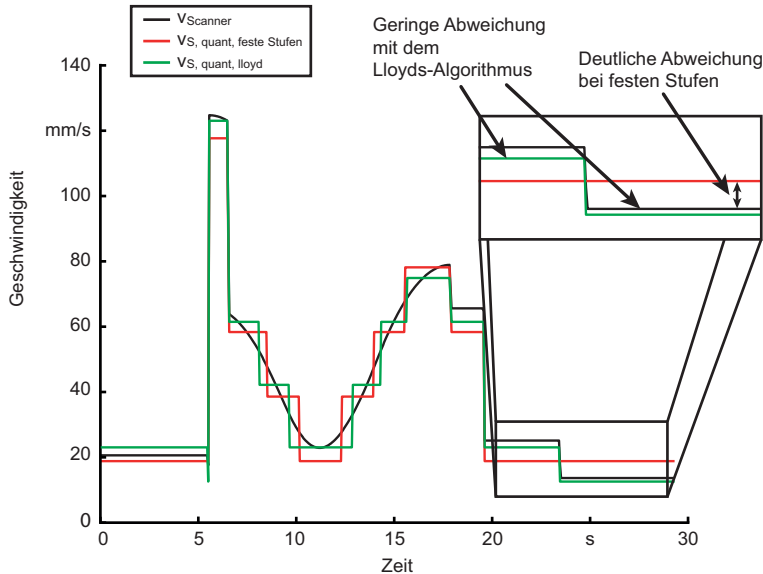


Abbildung 5.25: Vergleich der Quantisierungsmethoden;  $v_{\text{Scanner}}$  zeigt den Sollverlauf der Geschwindigkeit mit einem kontinuierlichen Geschwindigkeitsprofil;  $v_{\text{S, quant, feste Stufen}}$  zeigt den Geschwindigkeitsverlauf für Stufen mit einem festen Abstand;  $v_{\text{S, quant, lloyd}}$  zeigt den Geschwindigkeitsverlauf bei Stufen, die auf minimale Abweichungsquadrate hin optimiert wurden; jeweils wurden sieben Stufen vorgegeben.

In Abbildung 5.26 ist die Geschwindigkeit des Roboters  $v_{\text{Robo}}$ , die quantisierte Geschwindigkeit der Scanneroptik  $v_{\text{S, quant, lloyd}}$  mit 30 Stufen und die resultierende Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Prozess}}$  gezeigt. Anhand dieser Abbildung wird deutlich, dass die Bearbeitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Prozess}}$  von 100 mm/s mit einer Toleranz von weniger als 2% gehalten



## 5.4 Schritt 4: Berechnung der Bahnen für die Scanneroptik

werden kann. Die Kontur der Schweißnaht ist in der Abbildung anhand des Geschwindigkeitsverlaufs zu erkennen. Bei der Rundung muss die Geschwindigkeit der Scanneroptik permanent angepasst werden, während auf den geraden Abschnitten die Geschwindigkeit des Roboters und der Scanneroptik nahezu konstant bleiben. An allen Ecken sind große Geschwindigkeitsänderungen vorhanden, da der Roboter nicht exakt an der Ecke seine Bewegungsrichtung ändert und hier die Scanneroptik eine ausgleichende Bewegung durchführt. Mit diesen Bahnen ist eine qualitativ hochwertige Bearbeitung des Aufgabenteils möglich, da nur geringfügige Abweichungen von der benötigten Streckenenergie vorkommen.

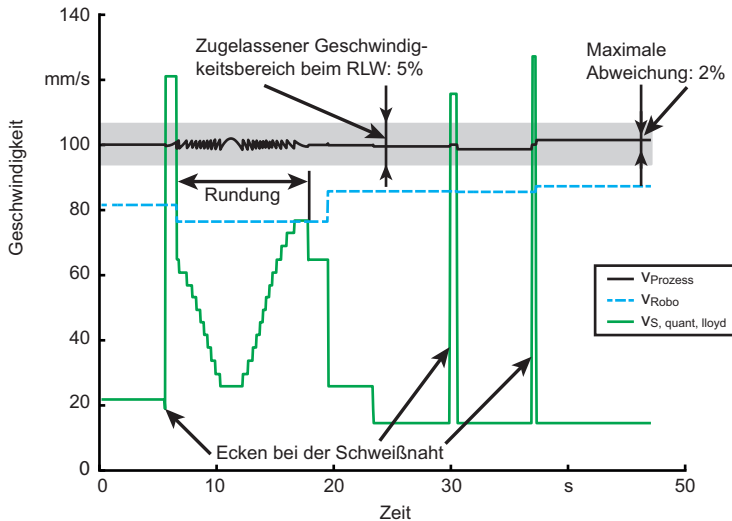


Abbildung 5.26: Ergebnis der Berechnung der Geschwindigkeiten für den Roboter, die Scanneroptik und die resultierende Geschwindigkeit des Brennflecks entlang der Schweißnaht bei der LKW-Türe

Sofern die Bearbeitung der Schweißnaht eine Wobbelbewegung des Laserstrahls vorsieht, muss diese oszillierende Bewegung noch der Scannerbahn überlagert werden. Dabei ist es möglich, unterschiedliche Wobbelgeometrien mit vorgegebener Amplitude  $A$  und Frequenz  $f$  zu erzeugen, welche die Qualität der Schweißnähte erhöht. Bei der Scannerbahn ist für jeden Abschnitt die zu fahrende Geschwindigkeit bekannt (siehe Abbil-

## **5 Bahnplanung für die robotergeführte Remote-Laserstrahlbearbeitung**

---

dung 5.26), daher kann die Wobbelgeometrie entlang der Scannerbahn gezogen werden, so dass die Halbe Amplitude oberhalb der Scannerbahn liegt und die Frequenz eingehalten wird. Alternativ können Wobbelfunktionen, welche in der Steuerung der Scanneroptik hinterlegt sind, verwendet werden.

### **5.4.3 Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 4**

Nachdem die relative Bahn zwischen dem Bauteil und der Scanneroptik aus Schritt 3 bekannt ist, wird in diesem Schritt gezeigt, wie die Bahnen beim RAC und beim RLW für die Scanneroptik programmiert werden können.

Bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten, wie beim RAC, ist auf die resultierenden, variierenden Geschwindigkeiten des Laserstrahls auf dem Bauteil nicht zu achten. Beim RLW, bei Bearbeitungsgeschwindigkeiten, die in der Größenordnung der Führungsgeschwindigkeiten liegen, wurde eine Möglichkeit gezeigt, mit der die Geschwindigkeit nahezu konstant gehalten werden kann, wenn nur eine bestimmte Anzahl an unterschiedlichen Geschwindigkeiten von der Scanneroptik gefahren werden kann.

Nach Beendigung dieses Schritts steht die Bahn für die Scanneroptik zusammen mit einem diskretisierten Geschwindigkeitsverlauf zur Verfügung. Damit sind alle Bahninformationen berechnet und die zweite Phase des Planungsmoduls, das Bahnplanungswerkzeug, ist abgeschlossen.

## **5.5 Schritt 5: Steuerungstechnische Umsetzung**

Die berechneten taktzeitoptimierten Bahnen für die Handhabungskinematik und für die Scanneroptik liegen nach den vorangegangenen Schritten in einer abstrakten Beschreibungsform vor. Bei der Handhabungskinematik sind das die Start- und Endpunkte der geraden Bahnen (siehe Abbildungen 5.16 und 5.22) und bei der Scanneroptik die Stützpunkte der Bewegung (siehe Abbildung 5.23). Damit die Bahnen von den realen Systemen abgefahren werden können, werden sie in der dritten Phase mit Transferbewegungen miteinander verknüpft und in die jeweilige Maschinensprache übersetzt.

### 5.5.1 Lasersicherheitsaspekte

Bei der Programmierung von Industrierobotern für Laserstrahlprozesse müssen Aspekte im Bereich der Lasersicherheit berücksichtigt werden. Dabei gilt es zu vermeiden, dass die laserstrahlformende Optik auf die Schutzwände der Laserstrahlfertigungszelle gerichtet wird. Der Boden wird als widerstandsfähig gegen die Laserstrahlung angesehen, zumindest für wenige Stunden. Beim vorgestellten Versuchsbauteil liegt die Ebene 3 um  $90^\circ$  gedreht am Bauteil (vgl. Abbildung 4.10). Aus diesem Grund muss zum Bearbeiten dieser Schnittkante auch die Scanneroptik in Richtung der Schutzwände gedreht werden. Bei den übrigen Aufgabenteilen ist die Scanneroptik prozessbedingt in Richtung des Bodens positioniert. Bei der Generierung der Transferbewegungen zwischen den einzelnen Prozessabschnitten kann in den Postprozessoren sichergestellt werden, dass die laserstrahlformende Optik nicht unnötig auf die Schutzwände gerichtet ist. Neben dieser Möglichkeit die Sicherheit in der Laserstrahlfertigungszelle zu verbessern, können mit Hilfe der Informationen aus der offline-Bahnplanung auch aktive Lasersicherheitssysteme einen weiteren Beitrag leisten.

Systeme zur aktiven Überwachung des Laserstrahls in der Fertigungszelle, beispielsweise die Systeme von HEBERER (2009), decken nur eingeschränkte Bereiche ab. Beim vorgestellten Versuchsbauteil können durch Abschattungen nicht alle Aufgabenteile von einer Position aus beobachtet werden, daher ist der Einsatz von mehreren Kamerasystemen nötig. Nach der offline-Bahnplanung ist die Position des Brennflecks auf dem Bauteil und der Zeitpunkt der Bearbeitung des jeweiligen Aufgabenteils im Roboterkoordinatensystem bekannt. Diese Zeit- und Ortsinformationen können verwendet werden, um die Sicherheit zu erhöhen. Dazu wird der Brennfleck nicht nur im Sichtfeld einer Kamera erfasst. Über Bilderkennungs-Software ist es möglich, die Position des Brennflecks im Sichtfeld der Kamera im Kamerakordinatensystem zu bestimmen. Wird dieses Kamerakordinatensystem in Bezug zum Roboterkoordinatensystem gesetzt und die Kamera zeitlich mit dem Abfahren des Anwenderprogramms synchronisiert, ist es möglich, die der Aufgabe entsprechenden Positionen des Brennflecks im Raum sicher zu verfolgen.

### **5.5.2 Postprozessoren**

Mit Hilfe von erstellten Postprozessoren werden die generierten Bahnen in die jeweilige Programmiersprache übersetzt, indem die Roboterposen aus den generierten Stützpunkten berechnet werden. Dabei ist wieder der aufgabenorientierte Ansatz von Vorteil, sollten spezielle Eigenschaften der Aufgabenteile Berücksichtigung finden müssen. Dies kann z. B. eine nötige Einstellung bei der Spannvorrichtung sein, um Schutzgas an den jeweiligen Aufgabenteil zu leiten oder das richtige Aufgabenteil zu fixieren. Sofern solche speziellen Befehle im Umweltmodell hinterlegt sind, werden sie automatisch in das Anwenderprogramm geschrieben. Zusätzlich werden auch Sensoren abgefragt, damit sichergestellt ist, dass die Spannvorrichtung oder andere Komponenten im richtigen Zustand sind.

### **5.5.3 Zusammenfassung und Anwendung von Schritt 5**

In diesem fünften und letzten Schritt im Planungsmodul werden die berechneten Bahnen für die Handhabungskinematik und die Scanneroptik in einer Simulation getestet. Nach einer erfolgreichen Überprüfung der Bahnen, werden sie über Postprozessoren in die jeweilige Maschinensprache der Handhabungskinematik und der Scanneroptik übersetzt und auf die Steuerungen überspielt.

Mit Hilfe der vorgestellten Bahnplanungsmethode wurde dargelegt, wie Scanneroptiken, die mit Handhabungskinematiken über Bauteile bewegt werden, programmiert werden können. Durch die generische Berechnung der Bahnen, unabhängig von den Herstellern der einzelnen Komponenten, bietet dieses Programmiersystem die Möglichkeit, nahezu beliebige Handhabungskinematiken und Scanneroptiken zu kombinieren. Dieser herstellerunabhängige Ansatz einer CAD/CAM-Kopplung nutzt die Vorteile der jeweiligen Komponenten durch die Verwendung der originalen Steuerungen, ohne zusätzliche Hardware.

## **6 Technische und wirtschaftliche Betrachtung**

Die Verwendung der vorgestellten Bahnplanungsmethode für einen möglichen industriellen Einsatz des RAC und des RLW wird im Folgenden exemplarisch an drei Funktionsmustern gezeigt. Dabei wird beschrieben, wie die gegenwärtige Bearbeitung mit konventionellen Verfahren (z. B. Stanzen sowie Laserstrahlschweißen und -schneiden mit kurzen Brennweiten) auf die Remote-Laserstrahlbearbeitung umgestellt werden kann.

Beim dritten Funktionsmuster wird neben der technischen auch eine wirtschaftliche Betrachtung vorgenommen, um den möglichen Nutzen der Remote-Laserstrahlbearbeitung für Unternehmen zu zeigen. Eine technische und wirtschaftliche Bewertung schließt das Kapitel ab.

### **6.1 Technische Betrachtung**

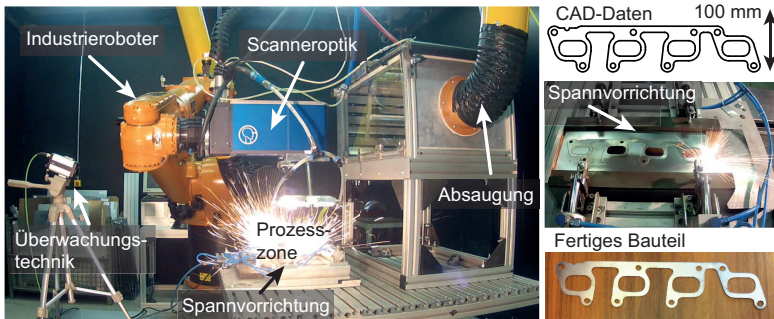
Anhand der Fertigung von Abgasanlagendichtungen, Strukturbauteilen aus Faserverbund-Kunststoffen und Wärmetauschern wird in diesem Abschnitt das technische Potential des RAC in Kombination mit der vorgestellten Bahnplanungsmethode aufgezeigt.

#### **6.1.1 Funktionsmuster 1: Ebenes Blech/ Abgasanlagendichtungen**

Die grundlegenden Versuche an unterschiedlichen Materialien für die Funktionalität der Generierung der Anwenderprogramme und für das Zusammenspiel zwischen Roboter und Scanneroptik wurden an einem ebenen Blech durchgeführt, welches flächig an zwei Seiten eingespannt war (siehe Abbildung 6.1). Dieser Versuchsaufbau ermöglicht ein schnelles und durch die flächige Auflage auch ein wiederholgenaues Spannen der Werkstücke. Des Weiteren hat dieser Versuchsaufbau einen direkten

## 6 Technische und wirtschaftliche Betrachtung

Bezug zu einem möglichen Anwendungsgebiet des RAC. Zylinderkopfdichtungen und Abgasanlagendichtungen (siehe Abbildung 6.1) bestehen aus dünnen Metallfolien und eignen sich damit für eine Fertigung mittels RAC (LÜTKE 2011; MUSIOL ET AL. 2012).



*Abbildung 6.1: Fertigung einer Abgasanlagendichtung, Remote-Laserstrahlfertigungszelle mit einer Spannvorrichtung zum flächigen Einspannen der Bauteile*

Zu den ersten Versuchen zählte der Funktionsnachweis der Berechnungen der Bahnen für verschiedene Roboter oder für einen Kreutztisch kombiniert mit einer Scanneroptik. Weiterführende Versuche mit unterschiedlichen Werkstücken, wie das Ermitteln der maximalen Robotergeschwindigkeit bei der fliegenden Bearbeitung, die Anzahl an nötigen Belichtungen zum Durchtrennen des Materials sowie verschiedene Einstellungen der Prozessparameter, um die Qualität der Schnitte zu verbessern, wurden im Anschluss durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse dieser Vorversuche dienen im Umweltmodell als Eingangsparameter, damit unter ihrer Einhaltung die taktzeitminimierten Bahnen berechnet werden können.

Im Folgenden wird die Fertigung von Abgasanlagendichtungen bei einem Automobil-Zulieferer beschrieben und aufgezeigt, wie aktuelle Fertigungsverfahren durch den Einsatz des RAC ersetzt werden können, um produktiver und flexibler zu Arbeiten.

Die Herstellung der Abgasanlagendichtungen ist ein mehrstufiges Verfahren, das durch den Einsatz von RAC und RLW verbessert werden kann. Die Dichtungen bestehen aus bis zu vier Lagen von dünnen Metallfolien mit einer Dicke von 0,2 mm, denen eine Struktur eingeprägt

ist. Zwischen den einzelnen Lagen der Ausschnitte, die durch Laserschweißpunkte fixiert und anschließend genietet werden, wird eine Dichtmasse aufgetragen. Es werden zwei unterschiedliche Fertigungsstrategien angewandt. Bei der Herstellung von Dichtungen für die Automobil-Serienproduktion müssen bis zu 2 Millionen Ausschnitte pro Jahr erzeugt und zu Dichtungen zusammengesetzt werden. Dieser Prozess ist weitestgehend automatisiert durch den Einsatz von Stanzanlagen. Für die Automobil-Vorserienproduktion werden hingegen nur 8000 bis 10 000 Ausschnitte benötigt. Viele manuelle Arbeitsschritte und konventionelle CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneidanalagen sichern hier eine hohe Flexibilität, da Änderungen an der Geometrie auch noch kurz vor Beginn der Fertigung vorkommen können. Die Schnittgeschwindigkeiten liegen dabei bei 200 mm/s, so dass die Taktzeit zum Heraustrennen der Zylinderkopfdichtung bei 60 s und bei der Abgasanlagendichtung bei 40 s liegt. Das manuelle Einlegen in eine Prägeanlage wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da dieser Vorgang nicht zu ersetzen ist, ebenso das Auftragen der Dichtmasse. Die übereinander liegenden Dichtungen werden für eine exakte Positionierung in einer Spannvorrichtung platziert und in einer CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneidanlage mit veränderten Prozessparametern punktuell verschweißt.

Bei der Großserienproduktion werden die Dichtungen mit einer Stanz-Präge-Anlage direkt von einem Metallfolienband geschnitten. Dabei kommen Folgeverbundwerkzeuge zum Einsatz, die mit vier aufeinanderfolgenden Hieben aus der Metallfolie die fertig geprägten und gestanzten Dichtungen produzieren. Durch das parallele Bearbeiten des Ausgangsmaterials und einer Hubfrequenz von 1 Hz wird pro Sekunde eine Dichtung ausgeworfen, obwohl die Zeit für die Fertigung einer Dichtung bei 4 s liegt. Die Lieferzeit für die benötigten Folgeverbundwerkzeuge muss mit 20 bis 26 Wochen veranschlagt werden. Deshalb ist ein langer zeitlicher Vorlauf bei der Serienproduktion erforderlich. Die restlichen Arbeitsschritte erfolgen in vollautomatisierten Anlagen.

Wird das RAC in eine Stanz-Präge-Anlage integriert und ersetzt dort den Stanz-Anteil der Anlage, erhöht sich auf der einen Seite die Komplexität, da zwei Anlagen kombiniert werden müssen. Auf der anderen Seite wird mehr Flexibilität gewonnen. Anstatt mit vier Hieben die einzelnen Dichtungen zu stanzen und zu prägen, kann in einem ersten Arbeitsschritt mittels RAC die Kontur ausgeschnitten werden. Das Prägen erfolgt direkt im Anschluss und der Auswurf der fertigen Dichtungen

ist nur von der Taktzeit des RAC mit 4 s pro Abgasanlagendichtung ( $v_{\text{Prozess}} = 8000 \text{ mm/s}$  bei 4 Belichtungen) abhängig. Die zur Bearbeitung nötige Scanneroptik muss nicht bewegt werden, da das Material zugeführt wird, es sich um eine reine 2D-Bearbeitung handelt und das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik größer ist, als eine Dichtung. Sie kann fest in der Anlage montiert werden, allerdings muss die Scanneroptik schwingungsfrei neben der Prägeanlage angebracht werden. Die Fertigung ist dann auf die Bearbeitungsfeldgröße der Scanneroptik beschränkt. Die räumliche Nähe des Prägens und des RAC erfordert eine lasersichere Einhausung der gesamten Anlage, was neben den zusätzlichen Steuerungen den benötigten Hallenplatz erhöht. Darüber hinaus kommen laufende Kosten wie Strom, Kühlwasser, Druckluft für den Cross Jet, Schutzgläser für die Scanneroptik und Filter für die Absaugung hinzu, die bei einer Stanz-Präge-Anlage nicht oder nur gering angefallen sind.

Reine Prägeanlagen können kleiner dimensioniert werden als Stanz-Präge-Anlagen, was die Investitionskosten reduziert. Zudem ist die Konstruktion reiner Prägewerkzeuge einfacher und die Kosten der Herstellung sowie die Lieferzeiten verringern sich je auf weniger als 50 %. Der Einsatz von RAC verkürzt somit den Produktionsstart (Start of Production, SOP) bei Großserien signifikant und ermöglicht dem Hersteller Wettbewerbsvorteile gegenüber Konkurrenten, da früher geliefert und deutlich schneller auf Änderungen reagiert werden kann. Zudem unterliegt der Laserstrahl im Vergleich zum Stanzwerkzeug keinem Verschleiß.

Das Potenzial des RAC zur Flexibilisierung der Produktion von Dichtungen ist bei Kleinserien noch deutlich ausgeprägter als bei der Großserienproduktion. Die benötigten Stückzahlen bei den Vorserien (bis zu 10 000 Stück) können auf der regulären Fertigungsanlage direkt von der Metallfolie geschnitten werden. Da das Prägen entfällt, kann die Metallfolie kontinuierlich unter der Scanneroptik hindurch bewegt werden und mit der fliegenden Bearbeitung sind die Nebenzeiten vernachlässigbar. Da in der Vorserienproduktion aufgrund der langen Fertigungszeiten keine Prägewerkzeuge zur Verfügung stehen, können die Ausschnitte näher aneinander gelegt werden, als dies beim Stanzen und Prägen möglich war sowie gedreht werden, um Material einzusparen (siehe Abbildung 6.2). Dies führt zu weniger Abfall und steigert die Wirtschaftlichkeit. Bei diesem Fertigungsszenario ist die Handhabungskinematik das Förderband, welches die Metallfolie gleichförmig bewegt. Die Richtung der Führungs-



bewegung ist damit bekannt und über die automatisierte Bahnplanung wird noch die zugehörige Geschwindigkeit und die Reihenfolge für die Bearbeitung der Aufgabenteile berechnet. Bei der Reihenfolge werden die Ausschnitte der gedrehten Dichtungen mit den anderen gemischt, um mit einer abwechselnden Belichtung aller im Bearbeitungsfeld der Scanneroptik liegenden Aufgabenteile den thermisch bedingten Verzug zu reduzieren. Bei einer Taktzeit von 4 s für das Ausschneiden der Dichtungen wird die Fertigungsanlage bei einer Stückzahl von 10 000 nur noch 12 bis 16 Stunden belegt. Verglichen mit dem bisherigen Heraustrennen der Dichtungen mittels dem kurzbrennweitigen Laserstrahlschneiden wird so die Produktionszeit der Dichtungen auf weniger als 10 % reduziert, da neben der verkürzten Prozesszeit auch das zeitintensive manuelle Einlegen und Herausnehmen entfällt. Des Weiteren können durch den Entfall der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneidanlagen und damit der manuellen Arbeitsschritte Mitarbeiter und Hallenplatz eingespart werden. Die ausgeschnittenen Abgasanlagendichtungen werden anschließend im Einzelverfahren auf einer weiteren Anlage manuell geprägt.

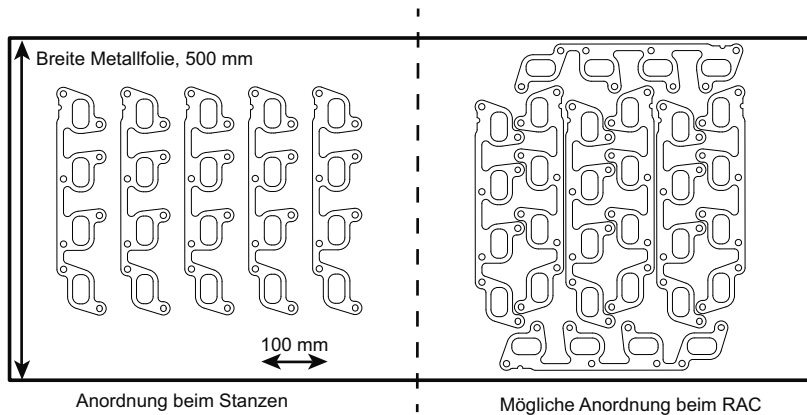


Abbildung 6.2: Vergleich der Anordnung von Abgasanlagendichtungen beim Stanzen mit der möglichen dichten Anordnung beim RAC; die Breite der Metallfolie ist aufgrund der etwas größeren Zylinderkopfdichtungen vorgegeben

### **Fazit der Fertigung von Dichtungen im Automobilbereich:**

Der Einsatz von RAC bei der Herstellung von Dichtungen im Automobilbereich bringt eine hohe Anlagenflexibilität in die Serienfertigung ein und kann bei der Fertigung von Vorserien die Produktionszeiten wesentlich verringern. Die Flexibilität wird mit der Integration neuer Hardware in die Produktionshalle, Software für die Programmierung und einer erhöhten Taktzeit in der Serienproduktion erkaufte. Mit Hilfe der in Kapitel 5 gezeigten Bahnplanungsmethode können die Anwenderprogramme für die Dichtungen direkt aus CAD-Daten erstellt werden und ein kontinuierliches Ausschneiden der Dichtungen ist von einer Metallfolie möglich. Die langen Fertigungszeiten der Stanzwerkzeuge entfallen, da die Informationen zur Herstellung der Dichtungen nicht mehr im Werkzeug sondern in der steuerungstechnischen Umsetzung liegen. Allerdings ist die Schnittkantenqualität der gefertigten Bauteile derzeit noch nicht ausreichend, um sie ohne Nacharbeit am entstehenden Grat in einem Automobil zu verwenden. Zudem muss die Bahngenaugkeit von Scanneroptiken noch weiter erhöht werden, um die Maßhaltigkeit und die Qualität der Schnittkanten in den Randbereichen zu verbessern.

### **6.1.2 Funktionsmuster 2: FVK-Strukturbauteil**

Faserverbund-Kunststoffe (FVK) werden in vielen Anwendungsgebieten als Werkstoffe der Zukunft angesehen. Ihre hohe Festigkeit bei gleichzeitig niedriger Masse machen sie in allen Bereichen, in denen die Masse des Produkts eine große Rolle spielt, attraktiv (GOEKE 2011). Da die Herstellung und die spanende Bearbeitung dieser hochfesten Materialien gegenwärtig noch zeitaufwändig und sehr teuer ist, werden FVK bislang vorwiegend nur in der Luft- und Raumfahrtindustrie und bei der Fertigung von Monocoques bei Rennwagen (HERBECK 2013) sowie bei Komponenten von Fahrrädern im Profisport (GOEKE 2011) eingesetzt. Bei der Herstellung von PKWs eignen sich diese Materialien, um den Leichtbau zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs weiter voran zu bringen, bei einer gleichzeitigen Verbesserung der Crash-Eigenschaften (HERBECK 2013). Bei Großserien müssen allerdings Bearbeitungsverfahren qualifiziert werden, um die Bauteile kostengünstig bei einer niedrigen Taktzeit und einer hohen Schnittkantenqualität zu produzieren. Der Einsatz von Laserstrahlung zum Bearbeiten von FVK ist aktuell Gegenstand von vielen Forschungsprojekten, da dieses Fertigungsverfahren

große Potenziale aufweist, die Herstellungskosten zu verringern. Erste Ergebnisse bei der Verwendung von Grundmode-Laserstrahlquellen zeigen gute Schnittergebnisse beim kurzbreitweitigen Laserstrahlschneiden (GOEKE 2011) und beim RAC (LÜTKE 2011; STOCK ET AL. 2012). Eine Übersicht über den zugehörigen Stand der Technik bei der Fertigung von FVK ist in GOEKE (2011) gegeben.

Die Bearbeitung von FVK-Materialien mittels RAC wurde bisher nur experimentell bei kleinen Versuchsbauteilen gezeigt. Eine Fertigung von realen Bauteilen mit dem RAC, welche die Größe des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik überschreiten, ist bis jetzt in der Literatur nicht zu finden. Für die Fertigung von solchen großen FVK-Bauteilen ist neben dem nötigen Prozesswissen eine geeignete Bahnführung des Laserstrahls nötig. Werden CAD-Daten der Bauteile in das Programmiersystem eingelesen, können die Anwenderprogramme automatisiert generiert werden, da die vorgestellte Bahnplanungsmethode unabhängig von dem zu bearbeitenden Material und nur von den Geometrie- sowie den Prozess-Informationen abhängig ist. Daher können auch große FVK-Bauteile mit dem RAC gefertigt werden, ohne dass eine zeitaufwändige händische Programmierung der Laserstrahlanlage nötig ist.

Beim RAC von FVK-Materialien können, im Gegensatz zu Metallen (siehe Abbildung 2.8), auch Bauteile mit 1 bis 3 mm Dicke wirtschaftlich bearbeitet werden. Aufgrund der Dicke der Materialien sind viele Belichtungen (meist mehr als 20) nötig und zwischen den einzelnen Belichtungen sind Wartezeiten von bis zu 0,5 s einzuhalten. Durch die langen Bearbeitungszeiten für jede Kontur wird die P&S-Strategie angewandt. Große Bearbeitungskonturen werden im ersten Schritt der Bahnplanungsmethode aufgeteilt und im dritten Schritt werden Posen für den Roboter oberhalb der Teilkonturen berechnet. Sofern die Genauigkeit des Roboters hoch genug ist, um die berechneten Posen exakt mehrfach anzufahren, kann nach jeweils einer Belichtung einer Teilkontur der Roboter zur nächsten Teilkontur fahren. Damit ist die Wartezeit für Transferbewegungen nutzbar. Dies hat zudem den Vorteil, dass zwischen zwei Belichtungen einer Schnittkante sehr lange Pausen entstehen, welche sich positiv auf die Schnittkantenqualität auswirken.

**Fazit der Fertigung von FVK-Strukturbauteilen:** Das Schneiden von FVK-Materialien mittels Laserstrahlung ist ein vielversprechendes Fertigungsverfahren, da die spanende Bearbeitung zeitaufwändig und aufgrund des hohen Verschleiß der Werkzeuge teuer ist. Bei FVK-Bauteilen, die größer als das Bearbeitungsfeld einer Scanneroptik sind, bedarf es einer sehr aufwändigen Programmierung der Anlage, da die Schnittkante in viele kleine Konturen aufgeteilt und der Roboter für jede kleine Schnittkante neu positioniert werden muss. Erst durch den Einsatz der vorgestellten Bahnplanungsmethode ist es möglich, große FVK-Bauteile mit dem Einsatz des RAC zu fertigen, ohne viel Zeit für die Programmierung aufwenden zu müssen, da die Schnittkantenkonturen aus CAD-Daten importiert werden können. Damit bietet sich das RAC bei der Fertigung von großen FVK-Strukturbauteilen an.

### 6.1.3 Funktionsmuster 3: Wärmetauscher

Das dritte betrachtete Funktionsmuster ist die Fertigung von Elementen eines Wärmetauschers, wie er in Abbildung 6.3 dargestellt ist. Der Wärmetauscher besteht je nach Anwendungsgebiet aus 10 bis 200 Wärmetauscherelementen, die auf einem Gestell verspannt sind. Jedes Wärmetauscherelement wird aus zwei Platten zusammengesetzt. Die Herstellung eines Wärmetauscherelementes umfasst gegenwärtig fünf Fertigungsschritte: Zuerst wird eine Platte mit allen Außenkonturen von einem Metallband gestanzt. Dieser Platte wird eine 3 mm hohe Wellenstruktur eingeprägt, die sowohl für eine erhöhte Stabilität der Platte sorgt als auch für eine verbesserte Wärmeübertragung. Dann werden vier kreisförmige Ausschnitte in jede Platte gestanzt. Das Verbinden beider Platten zu einem Wärmetauscherelement mittels konventionellen CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißen (Laserleistung: 5 kW, Schweißgeschwindigkeit: 66,6 mm/s (4 m/min)) wurde an einen Lohnfertiger ausgelagert. Diese Art von Wärmetauschern ist z. B. bei der Zuckerrübenverarbeitung im Einsatz und muss nach definierten Gebrauchszeiten ersetzt werden, da die Flüssigkeiten das Material angreifen und sich Bestandteile der Flüssigkeiten im Wärmetauscher absetzen. Daher kann von einem konstanten Bedarf von 50 000 Stück/Jahr der gefertigten Wärmetauscherelemente ausgegangen werden.

Bei der Fertigung der Wärmetauscherelemente soll das Stanzen der Löcher an den Lohnfertiger ausgelagert werden, da die geprägte Wellen-

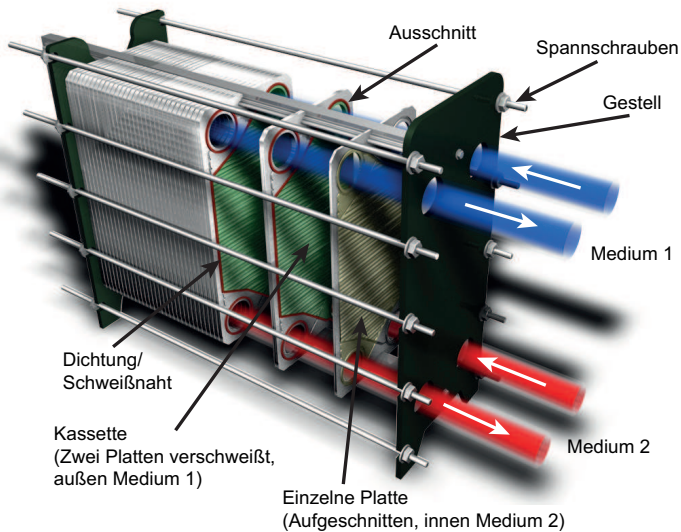


Abbildung 6.3: Funktionsdarstellung eines Wärmetauschers

struktur einen hohen Verschleiß beim Stanzwerkzeug hervorruft. Ein Stanzen der Löcher vor dem Prägen ist nicht möglich, da sich die Platten beim Prägen zu sehr verformen. Untersuchungen mit unterschiedlichen Laserstrahlprozessen zum Schneiden der Löcher haben gezeigt, dass nur mit dem Einsatz vom RAC die benötigte Schnittkantenqualität erreicht wird. Mit der Grundmode-Laserstrahlquelle, die für das RAC benötigt wird, können auch die Schweißnähte erzeugt werden. Zudem bietet sich der Einsatz von Faserlaserstrahlquellen mit einem Wirkungsgrad von 30 % (GRUPP 2006) als Ersatz von CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquellen mit einem Wirkungsgrad von 5 bis 15 % (DIN 1011-6 2006) an, um energieeffizienter und günstiger zu fertigen.

In einem ersten Arbeitsschritt wurden Prozessuntersuchungen mit dem Material des Wärmetauschers durchgeführt, um den Nachweis zu erbringen, dass der Einsatz von Grundmode-Laserstrahlquellen möglich ist. Versuche beim RLW und RAC mit dem Material haben zu folgenden Prozess-Informationen geführt: Beim RAC wird eine Bearbeitungsgeschwindigkeit von 6000 mm/s und 20 Belichtungen verwendet, wobei zwischen den Belichtungen eine Pause von 200 ms eingehalten werden

muss. Dies führt zu einer Bearbeitungszeit für eine Schnittfuge von 5,15 s. Die hohe Anzahl an Belichtungen ist bedingt durch die Wellenstruktur der Schnittfuge in Höhe von 3 mm. Eine Bearbeitung ist nur möglich, wenn der Fokus oben auf die Wellenstruktur gelegt ist und die Schnittfuge öfters belichtet wird, als dies für ein flaches Bauteil nötig wäre. Eine Fokussachführung entlang der Wellenstruktur mittels auf dem Markt verfügbarer Post-Objektiv-Scanneroptiken übersteigt nach Rücksprache mit den Herstellern deren Dynamik und stellt daher keine Alternative dar.

Um die benötigten Schweißnahtbreiten auf der Unter- bzw. der Oberseite von 0,8 bis 1,0 mm zu erreichen, muss der Bahn des Laserstrahls eine oszillierende Bewegung überlagert werden, da der Laserstrahl im Fokus nur einen Durchmesser von 50  $\mu\text{m}$  aufweist, bedingt durch das RAC. Solch eine Wobbelbewegung ist in Abbildung 2.6 auf Seite 17 gezeigt. Die bestimmte Schweißgeschwindigkeit beträgt 100 mm/s (6 m/min) bei einer Wobbelamplitude von 0,5 mm und einer Wobelfrequenz von 1000 Hz. Beide Prozesse werden mit einer Laserleistung von 3 kW durchgeführt.

Nachdem der Funktionsnachweis für die einzelnen Fertigungsschritte erbracht werden konnte, wurde eine prototypische Schweiß- und eine Schneidspannvorrichtung aufgebaut und im Arbeitsraum eines Industrieroboters platziert, wie in Abbildung 6.4 vereinfacht dargestellt ist. Für die Fertigung werden zwei geprägte Platten in die Schneidvorrichtung eingelegt und zwei gelochte Platten in die Schweißvorrichtung. Das Einlegen erfolgt in einem manuellen Arbeitsschritt. Anschließend können beide Prozesse im Automatikbetrieb durchgeführt werden. Mit Hilfe des Auswerfers (siehe Abbildung 6.4) wird sichergestellt, dass die Ausschnitte aus den Platten entfernt werden und folglich kein Nacharbeiten nötig ist. Der Auswerfer wird von der Robotersteuerung angesteuert und kann in zwei Positionen gefahren werden, damit er beide Platten erreicht. Die fertig gelochten Platten kommen anschließend in die Schweißvorrichtung und zwei neue Platten werden für das RAC eingelegt. Obwohl die Fertigung der einzelnen Wärmetauscherelemente eine reine 2D-Anwendung ist, wird ein Industrieroboter als kostengünstige Handhabungskinematik eingesetzt, da die einzelnen Platten wegen einer vereinfachten Konstruktion der Spannvorrichtungen in unterschiedlichen Ebenen liegen. Zudem muss ein großer Arbeitsraum abgedeckt werden. Am Flansch des Industrieroboters ist eine Scanneroptik montiert, um den Laserstrahl mit den nötigen Geschwindigkeiten für das RAC und das RLWW zu bewegen.

Für die Fertigung wird die in Abschnitt 4.4.2 beschriebene Laserstrahlfertigungszelle mit einer Spannvorrichtung für den Wärmetauscher verwendet. Damit steht eine prototypische Laserstrahlfertigungszelle für die Herstellung der Wärmetauscherelemente zur Verfügung sowie alle nötigen Informationen für das Umweltmodell aus Abbildung 4.2.

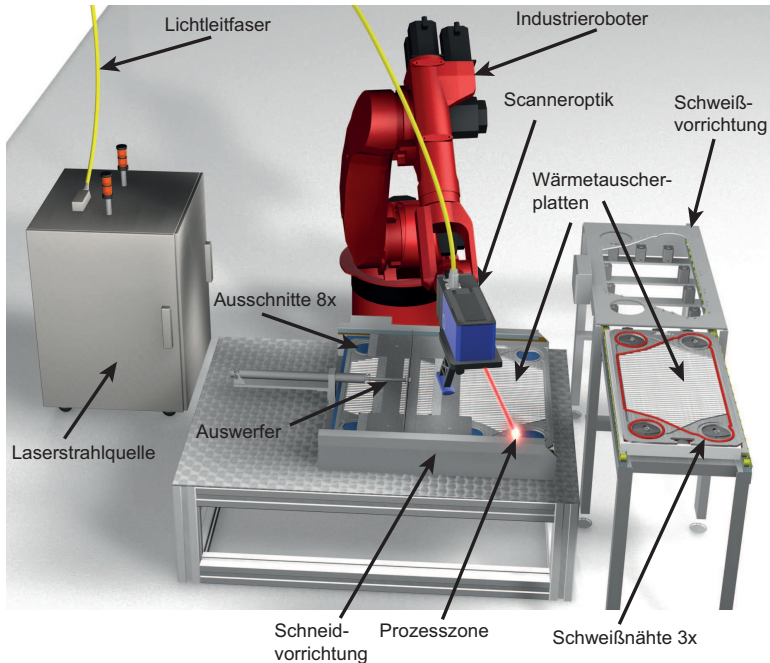


Abbildung 6.4: Prototypischer Aufbau für eine Fertigung der Wärmetauscherelemente mit einem Industrieroboter, einer Scanneroptik und den Schweiß- und Schneidaufgaben

Die Generierung der Anwenderprogramme für den Industrieroboter und die Scanneroptik erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 5 vorgestellten Bahnplanungsmethode. Dazu werden neben dem Umweltmodell noch die Prozess- und die Geometrie-Informationen für das Aufgabenmodell über Benutzerschnittstellen im Programmiersystem der Bahnplanungsmethode bereit gestellt. Die Wärmetauscherplatten bestehen aus einem 0,6 mm dicken Edelstahl mit einer 3 mm hohen eingeprägten Wellenstruktur. Eine

Platte hat Ausmaße von ca.  $500 \times 1000 \text{ mm}^2$ . Die acht kreisförmigen Ausschnitte, die in die Platten eingebracht werden müssen, haben jeweils einen Durchmesser von 110 mm. Es sind zusätzlich drei geschlossene Schweißnähte zu ziehen, zwei kreisförmige Schweißnähte mit je 130 mm Durchmesser und eine Schweißnaht, die entlang einer Außenkontur führt (siehe Abbildung 6.4). Die Prozess-Informationen können aus den Vorversuchen übernommen werden.

Die Eingabe der Geometrie-Informationen erfolgt mit Hilfe des Industrieroboters, CAD-Daten der Bauteile werden daher nicht benötigt. Dies wird ermöglicht, da jede Kontur in einer Ebene liegt und unter den elf Aufgabenteilen zehn Kreise sind. Zudem sind alle Ebenen zueinander nahezu parallel ausgerichtet. Ein Kreis ist durch Angabe seines Mittelpunktes inkl. der Orientierung und seines Radius vollständig beschrieben. Wird die Scanneroptik durch den Roboter parallel zum Werkstück ausgerichtet und im Fokusabstand über dem Mittelpunkt des Kreises positioniert, können nach Abbildung 2.10 auf Seite 27 seine exakten Koordinaten in Roboterkoordinaten gewonnen und in einem kleinen, händisch erstellten Anwenderprogramm abgelegt werden. Zusammen mit dem bekannten Radius steht somit eine komplette Beschreibung jedes kreisförmigen Aufgabenteils zur Verfügung. Die Kontur des elften Aufgabenteils, einer großen, umlaufenden Durchgangsschweißnaht, wird mit Hilfe der Aufzeichnungsfunktion des Roboters eingelesen. Dazu wird mit dem Roboter die Schweißnaht per Teach-In programmiert, indem er senkrecht und im Fokusabstand zu ihr bewegt wird.

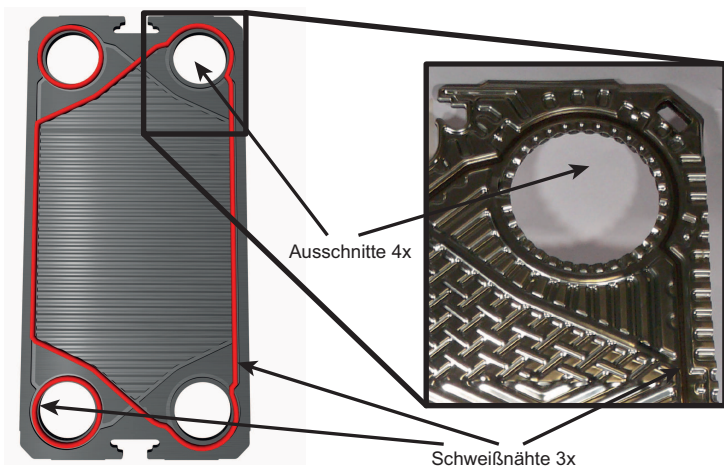
Nachdem die Geometrie-Informationen in dem händisch erstellten Anwenderprogramm gespeichert sind, werden sie zu Beginn der Bahnplanung direkt daraus extrahiert und in das Aufgabenmodell geschrieben. Im ersten Schritt der Bahnplanung wird aus der Beschreibung der Kreise die zu bearbeitenden Konturen berechnet und mit der großen Durchgangснаht in das benötigte Datenformat konvertiert. Anschließend werden über die Bahnplanungsmethode (Kapitel 5) die Programme für den Industrieroboter sowie die Scanneroptik automatisiert berechnet. Dabei wird über eine Sortierung eine möglichst minimale Taktzeit angestrebt. Mit Hilfe der Postprozessoren werden die Bewegungen in die Anwenderprogramme automatisch überführt, damit sie direkt auf den jeweiligen Steuerungen abgefahren werden können.

Bei der Bearbeitung kommen für eine optimale Fertigung zwei unterschiedliche Bewegungsstrategien zur Anwendung. Aufgrund der langen



Bearbeitungszeit für eine Schnittfuge von 5,15 s und den Abständen zwischen zwei Konturen bietet sich eine fliegende Bearbeitung nicht an. Die Ausschnitte werden bei stehendem Roboter ausschließlich durch die Scanneroptik mit der P&S-Strategie eingebracht. Beim Bearbeiten der umlaufenden Durchgangsschweißnaht ist dagegen eine fliegende Bewegung nötig, da sie prozessbedingt nicht in mehrere kleine Teile zerlegt werden darf. Da die anderen beiden Schweißnähte sehr nah an der großen liegen, werden alle mit einer fliegenden Bewegung bearbeitet.

Die reale Fertigung mit einer Remote-Laserstrahlfertigungsanlage und den prototypischen Spannvorrichtungen ist in Abbildung 1.1 auf Seite 3 zu sehen. Mit Hilfe dieses Versuchsaufbaus konnte die qualitativ hochwertige Fertigung der Wärmetauscherelemente gezeigt werden (siehe Abbildung 6.5). Durch den Einsatz der aufgabenorientierten Programmierung können andere Wärmetauscher-Geometrien mit wenig Aufwand programmiert und gefertigt werden. Es muss lediglich ein neues Anwenderprogramm händisch per Teach-In mit den Positionen der Mittelpunkte der kreisförmigen Aufgabenteile sowie der zugehörigen Radien und der umlaufenden Schweißnaht erstellt werden.



*Abbildung 6.5: Gefertigtes Wärmetauscherelement*

**Fazit der Fertigung für Wärmetauscher:** Anhand der Fertigung von Wärmetauscherelementen wurde exemplarisch gezeigt, wie beim Aufbau einer neuen Fertigung vorgegangen werden kann. Nachdem der Funktionsnachweis an Materialproben erbracht werden konnte, wurde eine prototypische Remote-Laserstrahlfertigungszelle mit spezialisierten Spannvorrichtungen aufgebaut, um die mögliche Fertigung der Wärmetauscherelemente zu zeigen.

Mit Hilfe der beschriebenen aufgabenorientierten Programmierung kann die Fertigung von Wärmetauscherelementen mit wenig Aufwand auf weitere Geometrien übertragen werden. Damit steht ein flexibles Programmiersystem für die gesamte Remote-Laserstrahlanlage zur Verfügung, das ein Materialbearbeitungsexperte bedienen kann, wobei er nur noch Fachkenntnisse über Standardfunktionen eines Roboters benötigt. Die Verteilung der Bewegungen auf den Roboter und die Scanneroptik wird automatisch über das Planungsmodul durchgeführt.

### 6.2 Wirtschaftliche Betrachtung des Funktionsmusters 3

Aufbauend auf den positiven Ergebnissen der Fertigung der Wärmetauscherelemente wird eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt, um die beschriebene Fertigung mit dem RAC und RLWW mit der konventionellen Fertigung mittels einer CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquelle zu vergleichen. In der folgenden Wirtschaftlichkeitsrechnung werden drei Szenarien aus der Sicht des Lohnfertigers betrachtet, wie mit unterschiedlichen Laserstrahlfertigungsanlagen die Serienfertigung der Wärmetauscherelemente realisiert werden kann.

- Szenario 1: Der Auftrag zum Ausschneiden wird abgelehnt. Die Platten werden weiterhin nach dem Prägen gestanzt und damit wie bisher gelocht an den Lohnfertiger ausgeliefert. Es wird eine neue CO<sub>2</sub>-Laserstrahlfertigungszelle aufgebaut, um jeweils zwei Platten mit dem kurzbrennweitigem Laserstrahlschweißen zu einem Wärmetauscherelement zu verbinden. Die Fertigung erfolgt mit einer 2D-Portalanlage und einer Festoptik, welche den CO<sub>2</sub>-Laserstrahl mit einer Leistung von 5 kW auf das Werkstück fokussiert.

- Szenario 2: Der Auftrag zum Ausschneiden wird angenommen. Es wird eine Laserstrahlfertigungszelle mit einer Grundmode-Laserstrahlquelle aufgebaut, damit die Prozesse RAC und RLWW realisiert werden können. Zusätzliche Hardware (z. B. BECKER ET AL. (2008), VOGL & MUNZERT (2012)) für die Kopplung des Industrieroboters mit der Scanneroptik muss auf die Verwendung für Grundmode-Laserstrahlquellen angepasst sowie die Programmierung für das RAC erweitert werden. Aufgrund verlängerter Prozess- und Bestückungszeiten sind zwei Bearbeitungsstationen mit Wechseltisch erforderlich, um die benötigten Stückzahlen zu erreichen.
- Szenario 3: Der Auftrag zum Ausschneiden wird angenommen. Die neue Laserstrahlfertigungszelle aus dem Szenario 2 mit dem Wechseltisch und zwei Bearbeitungsstationen wird nur mit konventionell erhältlicher Standard-Hardware (Industrieroboter und Scanneroptik) für die Remote-Laserstrahlbearbeitung ausgestattet. Das in der vorliegenden Dissertation gezeigte Vorgehen mit dem Programmersystem und der Bahnplanungsmethode wird angewandt.

Die in den folgenden Tabellen verwendeten Abkürzungen werden nicht im Formelverzeichnis aufgeführt, da es sich um gängige Bezeichnungen bei der Kostenrechnung handelt. Alle Zahlenwerte und die Beschreibungen der drei Szenarien wurden im Rahmen von Expertenbefragungen ermittelt.

Zuerst werden bei den drei Szenarien die Investitionskosten miteinander verglichen (siehe Tabelle 6.1). Die Kosten für die lasersichere Fertigungszelle ist beim Einsatz einer Grundmode-Laserstrahlquelle höher als bei einer CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquelle. Ebenso werden höhere Kosten für die zusätzliche Spanntechnik für das Ausschneiden anfallen. Bei der Spanntechnik für das RAC und das RLWW muss der prototypenhafte Aufbau aus Abbildung 6.4 erweitert werden, damit zwei Bearbeitungsstationen zur Verfügung stehen. Diese müssen auf einem Wechseltisch platziert werden, so dass immer eine Station in der Fertigungszelle zur Bearbeitung ist und die andere außerhalb, damit sie bestückt werden kann. In Tabelle 6.1 wird deshalb von doppelt so hohen Kosten für die Spanntechnik ausgegangen.

Der größte Unterschied bei den Investitionskosten liegt neben der Laserstrahlquelle bei der Anlagensteuerung und deren Programmierung. Im ersten Szenario werden alle Funktionen von der Portalanlage angesteu-

## 6 Technische und wirtschaftliche Betrachtung

ert, daher fallen keine weiteren Kosten für eine Anlagensteuerung an. Zur Programmierung der Anlage absolviert ein Mitarbeiter eine Grundlagenschulung für die neue Portalanlage, damit alle Änderungen bei der Programmierung im Laufe der Nutzungsdauer der Anlage vor Ort vorgenommen werden können. Die höchsten Kosten bei der Anlagensteuerung werden im Szenario 2 durch die zusätzliche Hardware verursacht. Es muss entweder ein System angeschafft werden, welches eine Kopplung zwischen dem Industrieroboter und der Scanneroptik realisiert oder die Ansteuerung der Scannerachsen wird direkt in die Robotersteuerung integriert. Bei beiden Varianten muss das System von der aktuellen Schweißanwendung auf das RAC erweitert werden, was Entwicklungsaufwand für die Hard- und Software bedeutet. Zudem sind Schulungen auf den drei neuen Hardware-Systemen nötig und es wird durch die Komplexität der Anlage von einer erhöhten Unterstützung bei der Programmierung durch den Hersteller der zusätzlichen Hardware ausgegangen. Im dritten Szenario entfallen die zusätzlichen Kosten für Spezial-Hardware. Es werden nur anteilig die Entwicklungskosten für das Programmiersystem sowie Anpassungen an die spezielle Fertigungsaufgabe berechnet. Die Programmierung der Anlage vereinfacht sich, da der Maschinenbediener nach einer Grundlagenschulung am Roboter alle nötigen Geometrie-Informationen für das Programmiersystem direkt mit dem Roboter per Teach-In eingeben kann. Die Generierung der Roboter- und Scanneranwenderprogramme erfolgt automatisch.

Investitionskosten	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Laserstrahlquelle	280 000 €	400 000 €	400 000 €
Roboter bzw. Portalanlage	190 000 €	60 000 €	60 000 €
Scanneroptik bzw. Festoptik	12 500 €	100 000 €	100 000 €
Fertigungszelle und Peripherie	40 000 €	100 000 €	100 000 €
Spanntechnik	50 000 €	100 000 €	100 000 €
Anlagensteuerung	-	150 000 €	40 000 €
Aufbau und Inbetriebnahme	50 000 €	50 000 €	50 000 €
Programmierung der Anlage	3 000 €	18 000 €	10 000 €
Summe	625 500 €	978 000 €	860 000 €

*Tabelle 6.1: Investitionskosten für die drei Szenarien der Fertigung der Wärmetauscher*

Die Investitionskostenrechnung aus Tabelle 6.1 zeigt die Unterschiede zwischen den drei Szenarien bei der Beschaffung der Laserstrahlfertigungsanlagen. Die CO<sub>2</sub>-Laserstrahlfertigungszelle ist die kostengünstigste

## 6.2 Wirtschaftliche Betrachtung des Funktionsmusters 3

te Variante während die Remote-Laserstrahlfertigungszelle mit zusätzlicher Hardware die höchsten Kosten verursacht.

Im nächsten Schritt der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden aus den möglichen Arbeitszeiten und den Prozessbeschreibungen aus der Prototypenfertigung die maximale Anzahl zu fertigender Wärmetauscherelemente pro Jahr berechnet (siehe Tabelle 6.2). Als Nutzungsdauer werden sechs Jahre angesetzt, in denen im Zwei-Schichtbetrieb an 220 Tagen pro Jahr gearbeitet wird. Alle Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten werden mit dem Posten Anlagenverfügbarkeit von der Arbeitszeit abgezogen. Bei der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlanlage kann durch eine langjährige Erfahrung von einer höheren Verfügbarkeit ausgegangen werden. Die Taktzeit setzt sich aus der Gesamtprozesszeit und der Zeit für den Bauteilwechsel zusammen. Mit diesen Fertigungszeiten können die benötigten 50 000 Wärmetauscherelemente pro Jahr mit einer zusätzlichen Sicherheit von ca. 10 % hergestellt werden.

Berechnung der möglichen Bauteile pro Jahr		S1	S2	S3
Nutzungsdauer [a]	ND	6	6	6
Arbeitszeit* [h/a]	EZ	3520	3520	3520
Anlagenverfügbarkeit [%]	V	85	80	80
Schweißen [s]	t <sub>Schweißen</sub>	45	30	30
Schneiden [s]	t <sub>Schneiden</sub>	0	42	42
Prozessnebenzeiten [s]	t <sub>Nebenzeiten</sub>	8	14	14
Gesamtprozesszeit [s]	t <sub>Gesamt</sub>	53	86	86
Gesamtzeit Laser ein [s]	t <sub>Laser ein</sub>	30	46,4	46,4
Bauteilwechselzeit pro Takt [s]	t <sub>Wechsel</sub>	145	100	100
Taktzeit [s]	t <sub>Taktzeit</sub> = t <sub>Gesamt</sub> + t <sub>Wechsel</sub>	198	186	186
Bauteilanzahl pro Stunde [Stk/h]	NB = V*3600/(t <sub>Taktzeit</sub> )	15,45	15,48	15,48
Bauteilanzahl pro Jahr [Stk/a]	NBA = NB*EZ	54 400	54 503	54 503

\*Die Arbeitszeit wird im 2-Schichtbetrieb mit je 8 Stunden bei 220 Tagen pro Jahr berechnet.

*Tabelle 6.2: Berechnung der zu fertigenden Wärmetauscherelemente pro Jahr*

Ausgehend von den Investitionskosten (Tabelle 6.1) und den Nutzungszeiten (Tabelle 6.2) kann nach Tabelle 6.3 der Maschinenstundensatz berechnet werden. Der Maschinenstundensatz setzt sich aus den Betriebskosten, den Abschreibungskosten, den Zinskosten und den Instandhaltungskosten zusammen. Für die Betriebskosten werden alle anfallenden Kosten für einen Quadratmeter Industriehalle (Abschreibung, Heizung, Beleuchtung, Reparatur, Kühlsysteme, usw.) und Verbrauchsmaterialien (Prozessgase, Schutzgläser, Druckluft, Filter für die Absaugung, usw.)

## 6 Technische und wirtschaftliche Betrachtung

zusammengefasst. Bei allen Szenarien kann in etwa von den gleichen anfallenden Kosten sowie vom gleichen Flächenbedarf ausgegangen werden. Eine exakte Bestimmung der jeweiligen Betriebskosten würde eine detaillierte Verbrauchsmessung in der realen Produktionsanlage erfordern. Da die Ermittlung der Betriebskosten nicht im Fokus dieser Arbeit stand, wird hier ein Erfahrungswert des Experten angenommen. Die Abschreibung und die Kosten für Zinsen beziehen sich ausschließlich auf die Investitionskosten für die Laserstrahlanlagen. Bei den Instandhaltungskosten kann, wie bei der Anlagenverfügbarkeit, davon ausgegangen werden, dass die CO<sub>2</sub>-Anlage die niedrigsten Kosten verursacht. Um der zusätzlichen und neuen Hardware beim Szenario 2 Rechnung zu tragen, wird der Instandhaltungskostensatz um einen Prozentpunkt erhöht. Der sich ergebende Maschinenstundensatz zeigt deutlich, dass mit den Remote-Laserstrahlanlagen mehr Wertschöpfung pro Stunde betrieben werden muss, als bei der CO<sub>2</sub>-Anlage.

Berechnung des Maschinenstundensatzes		S1	S2	S3
Flächenbedarf [m <sup>2</sup> ]	FB	50	50	50
Betriebskostensatz [€/m <sup>2</sup> /a]	BK	1000	1000	1000
Betriebskosten [€/h]	KB = FB*BK/EZ	14,20	14,20	14,20
Kalkulatorische Abschreibung [€/h]	KA = I/(ND*EZ*V)	34,84	57,88	50,90
Zinssatz [%]	Z	6	6	6
Kalkulatorischer Zinssatz [€/h]	KZ = I*Z/(2*EZ*V)	2,09	3,47	3,05
Instandhaltungskostensatz [%]	IKS	5	7	6
Instandhaltungskosten [€/h]	KI = I*IKS/(ND*EZ*V)	1,74	4,05	3,05
Maschinenstundensatz [€/h]	KMH = KA+KZ+KB+KI	52,88	79,61	71,21

*Tabelle 6.3: Berechnung des Maschinenstundensatzes*

Die bisherigen Berechnungen der Tabellen 6.1 bis 6.3 führt mit dem zu erzielenden Erlös pro Bauteil nach Tabelle 6.4 zu einer Kalkulation des Gewinns pro Bauteil und des Gesamtgewinns am Ende der Nutzungsdauer. Aufgrund der höheren Belastung des Anlagenbedieners durch die zwei Bearbeitungsstationen der Spannvorrichtung bei den Remote-Laserstrahlanlagen wird ein höherer Personenstundensatz zu Grunde gelegt. Bei der Berechnung der Kosten pro Bauteil können die Stromkosten nicht vernachlässigt werden, da sich der Wirkungsgrad bei den unterschiedlichen Laserstrahlquellen stark unterscheidet. Durch den niedrigen Wirkungsgrad bei der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquelle entstehen fünf mal so hohe Stromkosten, bei vergleichbaren Laserstrahleinschaltzeiten.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Serienfertigung im Vergleich zu einer konventionellen Laserstrahlfertigungszelle zeigt die möglichen

### 6.3 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Berechnung des Gewinnes		S1	S2	S3
Personalkosten [€/h]	KP	30	35	35
Gesamtkosten Anlage [€/h]	$K_{\text{gesamt}} = \text{KMH} + \text{KP}$	82,88	114,61	106,21
Wirkungsgrad Laser [%]	$\text{Wirk}_{\text{Laser}}$	10	30	30
Stromkosten [€/kWh]	SK	0,20	0,20	0,20
Stromkosten pro Bauteil [€/Stk]	SB	0,08	0,03	0,03
Stromkosten Laser pro Jahr [€/a]	$\text{NBA} * \text{SB}$	6800	1405	1405
Kosten pro Bauteil [€/Stk]	$\text{KF} = K_{\text{gesamt}} / \text{NB} + \text{SB}$	5,49	7,43	6,89
Erlös Schweißen [€]	ELW	6,00	6,00	6,00
Erlös Schneiden pro Plattenpaar [€]	ERAC	0,00	2,40	2,40
Gesamterlös [€]	$\Sigma E$	6,00	8,40	8,40
GBW pro Bauteil [€]	$\text{GB} = E - \text{KF}$	0,51	0,97	1,51
Gewinn Gesamt pro Jahr [€/a]	$G_{\text{gesamt}} = \text{GB} * \text{NBA}$	27 862	52 985	82 555
Gewinn nach Nutzungsdauer [€]		167 171	317 908	495 333

Tabelle 6.4: Berechnung des Gewinns bei der Fertigung der Wärmetauscher Elemente

Potenziale des Einsatzes der Remote-Laserstrahlprozesse in der Industrie auf. Ein Verzicht auf zusätzliche Hardware, wie es derzeit Stand der Technik ist, und die Anwendung der in der vorliegenden Arbeit gezeigten Bahnplanungsmethode, führt zum höchsten Gewinn.

### 6.3 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Die Betrachtung der drei unterschiedlichen Funktionsmuster und des Fertigungsbeispiels *LKW-Türe* zeigt die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten der Bahnplanungsmethode. Dies ist auf den aufgabenorientierten Ansatz zurückzuführen, bei dem die Schweißnähte und die Schnittkanten unabhängig vom Material und der Beschaffenheit des Bauteils in der Aufgabendefinition beschrieben sind. Eine Anwendung der vorgestellten automatisierten Bahnplanungsmethode ist somit in allen Branchen und bei allen Produkten möglich, wo die Prozesse RLW, RFC oder RAC eingesetzt werden.

Trotz des beschriebenen Potenzials des RAC, die Fertigung schneller und flexibler zu gestalten, werden das Stanzen und die spanende Bearbeitung weiterhin in vielen Fällen die bevorzugten Fertigungsverfahren bleiben. Ein Einsatzhemmnis ist dabei das noch fehlende Wissen über das Zusammenspiel der Hardware-Komponenten im Laufe der Serienproduktion. Die hohen Anforderungen des RAC an die Hardware-Komponenten

(siehe Abschnitt 2.1.3.3) sind hier im Speziellen zu nennen. Die Schnittkantenqualität beim RAC hängt maßgeblich vom Zustand der Laserstrahlanlage ab, wobei die Positionierung des Fokus des Laserstrahls auf dem Bauteil ein wesentlicher Faktor ist. Die gezeigten Versuche wurden bisher nur mit neuwertigen Industrierobotern und Scanneroptiken durchgeführt. Falls sich die Bahngenaugkeit der Scanneroptik oder des Roboters nach einem mehrjährigen Einsatz oder nach einer Kalibrierung der Achsen, z. B. nach einer Kollision, verschlechtert hat, ist eine synchrone Bewegung von Roboter und Scanneroptik nicht mehr gewährleistet und die fliegende Bearbeitung kann mit der vorgestellten Methode nicht mehr durchgeführt werden. Neben den Anforderungen an die Hardware muss sich die Programmierung der Anlage noch im industriellen Umfeld beweisen. Es fehlen bis jetzt Erfahrungswerte, wie viel Zeit benötigt wird, um die Programmierung für ein neues Bauteil unter realen Fertigungsbedingungen durchzuführen. Daher sind Aussagen über den Einsatz der Prozesse und der Bahnplanungsmethode erst möglich, nachdem ein Bauteil in Serie in einer industriellen Produktionsumgebung gefertigt wurde.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde allgemeingültig für ähnlich gestaltete Fertigungszellen und Bauteile erstellt. Bei einer Übertragung auf andere Fertigungszellen müssen die Investitionskosten in Tabelle 6.1 angepasst werden, wobei zu erwarten ist, dass die neuen Werte in der gleichen Größenordnung liegen. Sofern die Nutzungszeiten der Laserstrahlquelle bei anderen Bauteilen vergleichbar sind, können die Ergebnisse der gezeigten Wirtschaftlichkeitsrechnung direkt übertragen werden. Weichen die Fertigungszeiten deutlich von denen des beschriebenen Funktionsmusters ab, müssen die Werte für die Dauer des Schweißens und des Schneidens sowie die Prozessnebenzeiten und die Einlegezeiten angepasst werden. Dann kann das gezeigte Vorgehen der Wirtschaftlichkeitsrechnung auch bei weiteren Bauteilen angewandt werden.

Die Bewertung des Einsatzes der Remote-Prozesse und der neuen, automatisierten Bahnplanung zeigt, dass ein Einsatz in absehbarer Zeit nur dort möglich ist, wo gegenwärtig hohe Kosten durch den Verschleiß der Werkzeuge bei der Produktion entstehen, wie z. B. bei der Bearbeitung von FVK-Materialien, oder wo die benötigte Flexibilität nicht mit den bisherigen Fertigungsverfahren erreicht wird.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Remote-Laserstrahlprozesse haben das Potenzial, die Fertigungszeiten von Bauteilen erheblich zu verkürzen. Für deren industriellen Einsatz war die Entwicklung neuer Bahnplanungsmethoden nötig, um Remote-Laserstrahlfertigungsanlagen schnell und benutzerfreundlich programmieren zu können.

### 7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Entwicklung von Bahnplanungsmethoden, um Industrieroboter und Scanneroptiken für die Prozesse Remote-Laserstrahlschweißen, -Wobbelschweißen, -Schmelzdruckschneiden und -Abtragsschneiden einsetzen zu können, ohne dass spezialisierte Zusatzhardware nötig ist. Ausgehend vom derzeitigen Stand der Technik wird ein Programmiersystem gezeigt, welches mit vorhandenen Benutzerschnittstellen Informationen über die Fertigungszelle und -aufgabe einlesen kann. Nach einer automatisierten Bahnplanung werden die Bewegungen an die erforderlichen Hardware-Komponenten ausgegeben, damit die Fertigung beginnen kann. Die entwickelte Bahnplanungsmethode ist für eine fliegende Bearbeitung beim RAC ausgelegt, da dieser Laserstrahlprozess höchste Anforderung an die Laserstrahlpositioniersysteme stellt. Durch eine Kompatibilität der Bahnberechnungen zum RLW und RFC und einer Methode für Aufgabenteile, die größer als das Bearbeitungsfeld der Scanneroptik sind, wird eine kombinierte Bearbeitung von unterschiedlichen Laserstrahlprozessen bei nahezu beliebigen Bearbeitungskonturen in einer flexiblen Fertigungszelle ermöglicht.

Die Bahnplanungsmethode wurde im Rahmen eines aufgabenorientierten Programmieransatzes in ein Planungsmodul integriert. Im Planungsmodul werden aus einem Umweltmodell, in dem die Fertigungsanlage beschrieben ist, und einem Aufgabenmodell, in dem die Geometrie- und Prozess-Informationen der Schweiß- und Schneidaufgaben hinterlegt

sind, in fünf Schritten Bahnen für den Roboter und die Scanneroptik berechnet. Die ersten beiden Schritte bilden die Analysephase. In dieser Phase wird die Aufgabe in ein geeignetes Datenformat überführt und Eigenschaften der einzelnen Aufgabenteile, wie Größe und Dimension, bestimmt. Zudem werden nur die minimal erforderlichen Hardware-Komponenten ausgewählt und die Aufgabenteile mit Hilfe eines TSP-Algorithmus sortiert. Kernstück der Bahnplanungsmethode ist das Bahnplanungswerkzeug, in dem die Bahnen für die Handhabungskinetik und die Scanneroptik in den Schritten drei und vier berechnet werden. Dabei wird die Bewegung zwischen der Handhabungskinetik und der Scanneroptik aufgeteilt, um die jeweiligen Vorteile der Systeme zu nutzen. Im fünften und letzten Schritt werden die berechneten Bahnen für die Handhabungskinetik und die Scanneroptik in maschinenlesbare Anwenderprogramme überführt.

Nachdem die Funktionsweise der Bahnplanungsmethode exemplarisch an einem virtuellen Versuchsbauteil beschrieben wurde, konnte anhand von drei realen Funktionsmustern der mögliche Einsatz von RAC und RLW in der industriellen Fertigung gezeigt werden. Bei der Fertigung von Dichtungen im Automobilbereich können Vorserien von Zylinderkopf- sowie Abgasanlagendichtungen in ca. 10 % der Zeit produziert werden, im Vergleich mit dem kurzbrennweitigen Laserstrahlschneiden. Des Weiteren kann bei Großserien der SOP vorgezogen werden, da keine Stanzwerkzeuge mehr benötigt werden. Die Informationen zur Herstellung der Dichtungen liegt nicht wie bisher in der Geometrie der Schneide von Stanzwerkzeugen, sondern in den Anwenderprogrammen der Laserstrahlpositioniersysteme. Für diesen Einsatz des RAC ist allerdings die Schnittkantenqualität noch zu verbessern. Untersuchungen zur Bearbeitung von FVK-Bauteilen, welche die Größe des Bearbeitungsfeldes der Scanneroptik überschreiten, zeigen Möglichkeiten auf, mit der Bahnplanungsmethode unterschiedliche Werkstoffe zu bearbeiten. Bei Lohnfertigung kann die Erweiterung der Anlagentechnik auf eine Laserstrahlfertigungszelle mit einer Grundmode-Faserlaserstrahlquelle das Angebot an möglichen Prozessen erhöhen. Mit solch einer Laserstrahlquelle können mehrere Prozesse in einer flexiblen Laserstrahlfertigungszelle realisiert werden. Dies wurde anhand einer prototypischen Fertigung von Wärmetauscher-elementen gezeigt. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung für den Aufbau einer Serienfertigungsanlage belegt, welchen Nutzen diese neue Technologie einem Unternehmen bietet. Allerdings werden die Vorteile erst durch den Einsatz von automatisierten Bahnplanungsmethoden

ermöglicht, da sich mit dem beschriebenen Planungsmodul die Anwenderprogramme für die unterschiedlichen Bauteile schnell erstellen lassen. Am Ende der Dissertation zeigt eine kritische Bewertung der Funktionsmuster mögliche allgemeine Anwendungsbereiche sowie die aktuellen Grenzen des Ansatzes auf.

## 7.2 Ausblick

Laserstrahlprozesse werden bei der kundenindividuellen Fertigung sowie bei kleinen und mittleren Unternehmen selten eingesetzt. Gründe hierfür beruhen auf fehlendem Wissen in Bezug auf die Prozesse und die Technologie Laserstrahl allgemein, obwohl sich viele Unternehmer des Potenzials der Prozesse bewusst sind (EMMELMANN & KIRCHHOFF 2009). Um den Einsatz von laserstrahlbasierten Fertigungstechnologien zu erhöhen, wurden auf der einen Seite die Prozesse wissenschaftlich untersucht (LÜTKE 2011; OEFELE 2012). Auf der anderen Seite wurden unterschiedliche Bahnplanungssysteme entwickelt, um die Prozesse industriell einsetzen zu können (MUNZERT 2010; STEMMANN 2006). Ein Technologie-Planungsprogramm für Laserstrahlfügeprozesse soll zukünftig die Akzeptanz von Laserstrahlprozessen erhöhen, indem über automatisierte Wirtschaftlichkeitsrechnungen dem Anwender angegeben wird, ob sich diese Investition rechnet (EMMELMANN & KIRCHHOFF 2009). Die vorgestellte Bahnplanungsmethode lässt sich in solche Programme zur Planung für Prozessketten integrieren, um bei einer Auslegung von neuen Hallen oder bei einer Erweiterung der Fertigung abschätzen zu können, wie bestehende Systeme auch in Bezug auf das RAC und RLW genutzt werden können. Zusätzlich stehen schon nach der Planung die fertigen Anwenderprogramme zur Verfügung.

Neben der Integration der Bahnplanungsmethode in ein Technologie-Planungsprogramm, um die vor der Fertigung zu tätigenen Planungsprozesse zu unterstützen, kann der Einsatz von Sensorik den Transfer der generierten Anwenderprogramme an die reale Laserstrahlfertigungszelle verkürzen. Das Verschweißen von dünnwandigen Röhren-Wärmetauschern und I-Stößen zum Beispiel erfordert eine Nahterkennung und Anpassung der Laserstrahlbewegung an die jeweilige Lage des Werkstücks. Dafür bietet es sich an, Bilder durch die Scanneroptik aufzunehmen, um die exakte Position der Schweißnaht in Scannerkoordinaten zu erhalten. Gerade beim Übertrag der offline-generierten Roboter- und

Scanneranwenderprogramme können durch den Einsatz von Sensorik zusätzlich die realen und die simulierten Positionen abgeglichen werden. Ein Nachteachen ist dann nicht mehr nötig. Gleichzeitig kann über eine nachlaufende Beobachtung auch das Prozessergebnis überwacht werden. Beim RAC könnte über eine sensorielle Überwachung die Anzahl der Belichtungen geregelt werden, so dass keine unnötigen Belichtungen durchgeführt werden, nachdem das Material durchgeschnitten ist. Zudem können Abstandsmesser sicherstellen, dass der Fokus des Laserstrahls auf der Bauteiloberfläche liegt.

Die vorgestellte Bahnplanungsmethode kann auch bei anderen Fertigungsverfahren zur Anwendung kommen, wenn zur Strahlführung unterschiedliche Systemkomponenten eingesetzt werden. Dies ist zum Beispiel bei Elektronenstrahlprozessen möglich. Des Weiteren stehen als Anwendungsgebiete noch viele Möglichkeiten offen, bei denen eine Relativbewegung zwischen Scanneroptik und Werkstück von Vorteil ist.

# Literaturverzeichnis

## APPLEGATE 2007

Applegate, D. L.: *The Traveling Salesman Problem – A Computational Story*. Princeton University Press 2007, ISBN: 978-0-69112-993-8.

## ARGES GMBH 2011

ARGES GmbH: *InScript Software – Graphical User Interface*. 2011, <http://www.arges.de>, zuletzt geprüft am 01.11.2012.

## ARGES GMBH 2012

ARGES GmbH: *Remote Welding Elephant – Data Sheet*. 2012, <http://www.arges.de>, zuletzt geprüft am 12.11.2012.

## BACHMANN 2010

Bachmann, F.: *National Funding Initiatives for Laser Technology in Germany: Projects on Brilliant Laser Sources and their Application*. In: Panchenko, V.; Mourou, G.; Zheltikov, A. M. (Hrsg.): Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. SPIE 2010, Band 7994.

## BACKES 1997

Backes, F.: *Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie. Bamberg: Meisenbach 1997, ISBN: 3-87525-093-1.

## BARTELS ET AL. 2008

Bartels, F.; Schwarz, T.; Morgenthal, L.; Beyer, E.: *Studies in Increasing the Dynamic of Cutting Machines*. In: 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2008, Band 1506. Temecula, CA, USA, 20.-23. Oktober 2008, ISBN: 978-0-91203-512-3, S. 645–648.

### BAUR 2009

Baur, M.: *Remote Lasereinsatz bei der Türenfertigung des Audi A4/Q5*. In: 5. Internationaler Workshop Faserlaser. Dresden: Fraunhofer-IRB-Verlag 2009. Dresden, 30. September - 01. Oktober 2009, ISBN: 978-3-83960-062-7.

### BECKER ET AL. 2004

Becker, W.; Beck, M.; Bernhardt, R.: *Potentials of Robot-Guided Remote Laser Welding*. In: Geiger, M. (Hrsg.): 4th Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE). Bamberg: Meisenbach 2004. Erlangen, 21.-24. September 2004, ISBN: 3-87525-202-0, S. 201-210.

### BECKER ET AL. 2008

Becker, W.; Beck, M.; Stahs, T.: *Robot-Guided Remote Laser Welding: Process and Control*. In: Stuttgart Laser Technologie Forum (SLT), 2008. Stuttgart, 04.-06. März 2008.

### BERGMANN 2009a

Bergmann, U.: *Vereint Schnelligkeit und Flexibilität: Das Remote-schweißen mit dem Laserstrahl (Teil 1)*. Der Praktiker, Band 5 2009, S. 154-158.

### BERGMANN 2009b

Bergmann, U.: *Vereint Schnelligkeit und Flexibilität: Das Remote-schweißen mit dem Laserstrahl (Teil 2)*. Der Praktiker, Band 6 2009, S. 234-241.

### BERTELSMANN LEXIKON 1984

Bertelsmann Lexikon: *Die große Bertelsmann-Lexikothek, Fau - Ghal*, Band 5. Gütersloh: Bertelsmann 1984, ISBN: 3-57003-885-8.

### BEYER ET AL. 2003

Beyer, E.; Klotzbach, A.; Fleischer, V.; Morgenthal, L.: *Nd:YAG-Remote Welding with Robots*. In: Poprawe, R. (Hrsg.): 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2003. München, 24.-26. Juni 2003, S. 367-373.

BEYER ET AL. 2011

Beyer, E.; Lütke, M.; Bartels, F.; Klotzbach, A.; Wetzig, A.: *Übersichtsvortrag Remote-Schneiden*. In: Laser+Blech – Lasereinsatz in der Blechbearbeitung, 2011. Garching, 02.-03. März 2011.

BEYER 2005

Beyer, L.: *Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern – Insbesondere mit Parallelkinematik*. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität – Universität der Bundeswehr Hamburg (2004), Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik LaFT. Aachen: Shaker 2005, ISBN: 3-83223-681-3.

BISCHOFF ET AL. 2010

Bischoff, R.; Kurth, J.; Schreiber, G.; Koeppe, R.; Albu-Schäffer, A.; Beyer, A.; Eiberger, O.; Haddadin, S.; Stemmer, A.; Grunwald, G.; Hirzinger, G.: *The KUKA-DLR Lightweight Robot Arm – A new Reference Platform for Robotics Research and Manufacturing*. In: 41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). Berlin: VDE 2010. München, 07.-09. Juni 2010, ISBN: 978-3-80073-273-9, S. 741–748.

BRAUNREUTHER ET AL. 2009

Braunreuther, S.; Huber, S.; Oefe, F.; Trautmann, A.; Zäh, M. F.: *Systematic Development of Safe High Performance Laser Applications – Knowing the Limits of Conventional Systems*. In: Liu, X. (Hrsg.): 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2009. Orlando, FL, USA, 02.-05. November 2009, ISBN: 978-0-91203-559-8, Paper #905.

BRUHM ET AL. 2010

Bruhm, H.; Czinki, A.; Lotz, M.; Wenzel, V.: *A Motion Control Strategy for Robots in Laser Material Processing and other High Speed Applications*. In: 41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). Berlin: VDE 2010. München, 07.-09. Juni 2010, ISBN: 978-3-80073-273-9, S. 409–414.

CAPEK 1921

Capek, K.: *R.U.R. – Rossum's Universal Robots*. Uraufführung des Theaterstücks, Prag, 1921.

CHIBISOV 2009

Chibisov, D.: *Design of Algorithms for Motion Planning and Motion Prediction*. Dissertation, Technische Universität München (2008). 2009, <http://d-nb.info/1000381056/34>, zuletzt geprüft am 16.02.2013.

CONKUR & BUCKINGHAM 1997

Conkur, S.; Buckingham, R.: *Clarifying the Definition of Redundancy as used in Robotics*. Robotica, Band 15 1997, S. 583–586, <http://web.ics.purdue.edu/~park283/wp-content/uploads/2010/10/DEFN-of-redundancy.pdf>, zuletzt geprüft am 02.11.2012.

CRAIG 1988

Craig, J. J.: *Issues in the Design of off-line Programming Systems*. In: 4th International Symposium on Robotics Research. MIT Press 1988. Cambridge, ISBN: 0-26202-272-9.

CRAIG 2005

Craig, J. J.: *Introduction to Robotics*. 3. Auflage. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall 2005, ISBN: 0-20154-361-3.

DAUB 2012

Daub, R.: *Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen*, Dissertation, Technische Universität München, Forschungsberichte *iwb*, Band 263. München: Utz 2012, ISBN: 978-3-83164-199-4.

DENAVIT & HARTENBERG 1955

Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: *A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices*. ASME Journal of Applied Mechanics, Band 22 1955, S. 215–221.

DIN 1011-6 2006

DIN 1011-6: *Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 6: Laserstrahlschweißen*. Berlin: Beuth 2006.

DIN 11145 2008

DIN 11145: *Optik und Photonik – Laser und Laseranlagen*. Berlin: Beuth 2008.



DIN 11146 2005

DIN 11146: *Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios.* Berlin: Beuth 2005.

DIN 11553-1 2009

DIN 11553-1: *Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen.* Berlin: Beuth 2009.

DIN 14610 2005

DIN 14610: *Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe für Metallschweißprozesse.* Berlin: Beuth 2005.

DIN 2310-6 2003

DIN 2310-6: *Thermisches Schneiden – Teil 6: Einteilung, Prozesse.* Berlin: Beuth 2003.

DIN 8373 1996

DIN 8373: *Industrieroboter – Wörterbuch.* Berlin: Beuth 1996.

DIN 8580 2003

DIN 8580: *Fertigungsverfahren.* Berlin: Beuth 2003.

DIN 8590 2003

DIN 8590: *Fertigungsverfahren Abtragen.* Berlin: Beuth 2003.

DIN 8593-6 2003

DIN 8593-6: *Fertigungsverfahren Fügen – Teil 6: Fügen durch Schweißen.* Berlin: Beuth 2003.

DIN 9283 1999

DIN 9283: *Industrieroboter – Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethoden.* Berlin: Beuth 1999.

EINSTEIN 1916

Einstein, A.: *Zur Quantentheorie der Strahlung.* In: *Zur Quantentheorie der Strahlung, Mitteilungen* 16. 1916, S. 47–62.

### ELSNER 2008

Elsner, C.: *Status and Potential of Laserwelding of Gear Parts at Daimler AG*. In: Stuttgart Laser Technologie Forum (SLT), 2008. Stuttgart, 04.-06. März 2008.

### EMMELMANN 2005

Emmelmann, C.: *Laser Remote Welding – Status and Potential for Innovations in Industrial Production*. In: Beyer, E. (Hrsg.): 3rd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2005. München, 13.-16. Juni 2005, ISBN: 3-00011-673-7, S. 1–5.

### EMMELMANN & KIRCHHOFF 2009

Emmelmann, C.; Kirchhoff, M.: *Virtual Process Planning for Laser Joining Processes*. In: Ostendorf, A. (Hrsg.): 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2009. München, 15.-18. Juni 2009, ISBN: 978-3-00027-994-2, S. 415–420.

### EMMELMANN ET AL. 2011

Emmelmann, C.; Schenk, K.; Wollnack, J.; Kirchhoff, M.: *High-Precision Calibration of a Weld-On-The-Fly-System*. In: Schmidt, M. (Hrsg.): 6th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Physics Procedia 2011, Band 12 A. München, 23.-26. Mai 2011, S. 739–743, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001714>, zuletzt geprüft am 03.11.2012.

### FANUC ROBOTICS GMBH 2013

Fanuc Robotics GmbH: *Fanuc M-2000iA 1200, Datenblatt*, 2013, <http://www.fanucrobotics.de/>, zuletzt geprüft am 01.07.2013.

### FISCHER 2010

Fischer, E. P.: *Laser – Eine deutsche Erfolgsgeschichte von Einstein bis heute*. München: Siedler 2010, ISBN: 978-3-88680-946-2.

FRANZ ET AL. 2011

Franz, C.; Abels, P.; Rosler, R.; Becker, M.: *Energy Input per Unit Length – High Accuracy Kinematic Metrology in Laser Material Processing*. In: Schmidt, M. (Hrsg.): 6th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Physics Procedia 2011, Band 12 B. München, 23.-26. Mai 2011, S. 411–420, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211002306>, zuletzt geprüft am 29.09.2012.

GARNICH 1992

Garnich, F.: *Laserbearbeitung mit Robotern*, Dissertation, Technische Universität München 1991, Forschungsberichte *iwb*, Band 50. Berlin: Springer 1992, ISBN: 3-54055-513-7.

GOEKE 2011

Goeke, A.: *Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg (2010), Schriftenreihe Lasertechnik, Band 5. Göttingen: Cuvillier 2011, ISBN: 978-3-86955-618-5.

GOOK ET AL. 2009

Gook, S.; Gumenyuk, A.; Rethmeier, M.: *Orbital Laser-Hybrid Welding of Pipelines using a 20 kW Fibre Laser*. In: Ostendorf, A. (Hrsg.): 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2009. München, 15.-18. Juni 2009, ISBN: 978-3-00027-994-2, S. 65–70.

GÖTZ 2003

Götz, W.: *Dem Laser sein Handling*. Plastverarbeiter online, Band 54 2003 Heftnummer 10, S. 74–76, <http://ki-portal.de/ai/resources/b8c0c95de4e.pdf>, zuletzt geprüft am 21.11.2012.

GRAF 2009

Graf, T.: *Laser – Grundlagen der Laserstrahlquellen*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009, ISBN: 978-3-83480-770-0.

### GRIEBEL 2010

Griebel, M.: *Technical and Technological Approaches to an Efficient Application of Laser Beams with higher Brilliance*. In: 6th International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSC). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2010. Dresden, 05.-06. Oktober 2010, ISBN: 978-3-83960-197-6.

### GRUPP 2006

Grupp, M.: *Neue Schweißanwendungen mit dem Faserlaser*. In: Vollertsen, F.; Seefeld, T. (Hrsg.): *Strahltechnik – Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends – 5. Laser-Anwenderforum Bremen*. Bremen: BIAS-Verlag 2006, Band 28. 13.-14. September 2006, ISBN: 978-3-93376-218-4, S. 81–87.

### GRUPP ET AL. 2003

Grupp, M.; Seefeld, T.; Vollertsen, F.: *Laser Beam Welding with Scanner*. In: Poprawe, R. (Hrsg.): *2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM)*. Stuttgart: AT-Fachverlag 2003. München, 24.-26. Juni 2003, S. 375–379.

### HAGSPIEL 2010

Hagspiel, S.: *Modern Expert Arc and Spot Welding: World's first Arc and Spot Welding Robots with 7 Controlled Axes*. In: 41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). Berlin: VDE 2010. München, 07.-09. Juni 2010, ISBN: 978-3-80073-273-9, S. 1323–1328.

### HAMMER & BROCKMANN 2006

Hammer, T.; Brockmann, R.: *Scannerschweißen mit dem Scheibenlaser – Auf dem Weg zur Serienanwendung bei VW*. Laser Technik Journal, Band 3 2006, S. 36–38.

### HANGST 2007

Hangst, A.: *Concepts and Applications for Lasers of high Brilliance*. In: 3. Internationaler Workshop Faserlaser. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2007. Dresden, 14.-15. November 2007, ISBN: 978-3-81677-506-5.

HATWIG ET AL. 2012

Hatwig, J.; Minnerup, P.; Zäh, M. F.; Reinhart, G.: *An Automated Path Planning System for Robots and Laser Scanner for Remote Laser Cutting and Welding*. In: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2012. Chengdu, China, 05.-08. August 2012, ISBN: 978-1-46731-277-6, S. 1323–1328.

HAUGER ET AL. 2002

Hauger, W.; Schnell, W.; Gross, D.: *Technische Mechanik 3 – Kinetik*. 7. Auflage. Berlin: Springer 2002, ISBN: 978-3-54043-257-9.

HAVRILLA ET AL. 2011

Havrilla, D.; Ryba, T.; Holzer, M.: *High Power Disk Lasers – Advances & Applications*. In: Washio, K. (Hrsg.): 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2011, Band 614 (104). Orlando, FL, USA, 23.-27. Oktober 2011, ISBN: 978-0-91203-594-9, S. 749–755.

HEBERER 2009

Heberer, E. M.: *Laser on Time as Safety or only a Part of Safety*. In: International Laser Safety Conference (ILSC). Reno: Laser Institute of America 2009. Paper #1405.

HERBECK 2013

Herbeck, L.: *Herausforderungen bei der Industrialisierung einer Composites Produktion für den Automobilbau*. In: Münchener Kolloquium – Produktionskongress, 2013. München, 20. März 2013, S. 154–155.

HERING & MARTIN 2006

Hering, E.; Martin, R.: *Photonik - Grundlagen, Technologie und Anwendung*. Berlin: Springer 2006, ISBN: 3-54023-438-1.

HOLLERBACH & SUH 1987

Hollerbach, J. M.; Suh, K. C.: *Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization*. IEEE Journal of Robotics and Automation, Band 3 1987 Heftnummer 4, S. 308–316.

HORNFECK 2008

Hornfeck, T.: *Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie*, Dissertation, Technische Universität München, Forschungsberichte *iwb*, Band 221. München: Utz 2008, ISBN: 978-3-83160-826-3.

HÜGEL & GRAF 2009

Hügel, H.; Graf, T.: *Laser in der Fertigung – Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009, ISBN: 978-3-83510-005-3.

HUMBURGER 1998

Humburger, R.: *Konzeption eines Systems zur aufgabenorientierten Roboterprogrammierung*, Dissertation, RWTH Aachen, Fraunhofer IPT, Band 4/98. Aachen: Shaker 1998, ISBN: 3-82653-427-1.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2011a

International Federation of Robotics: *World Robotics 2011 – Industrial Robots*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH 2011, ISBN: 978-3-81630-615-3.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2011b

International Federation of Robotics: *World Robotics 2011 – Service Robots*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH 2011, ISBN: 978-3-81630-616-0.

KAHRS 2009

Kahrs, L. A.: *Bildverarbeitungsunterstützte Laserknochenablation am humanen Felsenbein*. Dissertation, Universität Karlsruhe. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2009, ISBN: 978-3-86644-458-4.

KLOTZBACH ET AL. 2009

Klotzbach, A.; Lütke, M.; Wetzig, A.; Beyer, E.: *Advanced Remote Cutting of Non-Metal Webs and Sheets*. In: Liu, X. (Hrsg.): 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2009. Orlando, FL, USA, 02.-05. November 2009, ISBN: 978-0-91203-559-8, S. 319–322.

KOLLER 1993

Koller, R.: *Grundlagen des methodischen Konstruierens von Laserschweißverbindungen*. In: Radaj, D.; Giering, A. (Hrsg.): *Laserschweißgerechtes Konstruieren*. Stuttgart 1993, S. 15–24.

KRAETZSCH ET AL. 2011

Kraetzsch, M.; Standfuss, J.; Klotzbach, A.; Kaspar, J.; Brenner, B.; Beyer, E.: *Laser Beam Welding with High-frequency Beam Oscillation: Welding of Dissimilar Materials with Brilliant Fiber Lasers*. In: Washio, K. (Hrsg.): *30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)*. Orlando: Laser Institute of America 2011, Band 614 (104). Orlando, FL, USA, 23.-27. Oktober 2011, ISBN: 978-0-91203-594-9, S. 169–178.

KROTH 2008

Kroth, E.: *Robot Supported Laser System*. *Laser Technik Journal*, Band 3 2008 Heftnummer 3, S. 33–36.

KUKA ROBOTER GMBH 2012

KUKA Roboter GmbH: *KR60 HA, Datenblatt*, 2012, <http://www.kuka.de>, zuletzt geprüft am 25.7.2012.

LASER ZENTRUM HANNOVER E.V. 2002

Laser Zentrum Hannover e.V.: *Laserstrahlgeschweißte Edelstahl-Waggons kommen ins Rollen*. *LZH Aktuell*, Band 41, Juni 2002.

LAVALLE 2006

LaValle, S. M.: *Planning algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press 2006, <http://planning.cs.uiuc.edu/>, zuletzt geprüft am 02.11.2012, ISBN: 978-0-52186-205-9.

LUDWIG 2011

Ludwig, R.: *Robotergestützte Qualitätsprüfung in der Automobilfertigung*, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg (2010), *Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik*, Band 18. Aachen: Shaker 2011, ISBN: 978-3-83229-787-9.

### LÜTKE 2011

Lütke, M.: *Entwicklung des Remote-Laserstrahlschneidens metallischer Werkstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dresden. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2011, ISBN: 978-3-83960-359-8.

### LÜTKE ET AL. 2009

Lütke, M.; Himmer, T.; Wetzig, A.; Beyer, E.: *Opportunities to enlarge the Application Area of Remote-Cutting*. In: Liu, X. (Hrsg.): 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2009. Orlando, FL, USA, 02.-05. November 2009, ISBN: 978-0-91203-559-8, S. 311–318.

### LÜTKE ET AL. 2010

Lütke, M.; Himmer, T.; Wetzig, A.: *From Drawing to the Device – Requirements and Approaches in Remote Cutting*. In: 6th International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSC). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2010. Dresden, 05.-06. Oktober 2010, ISBN: 978-3-83960-197-6.

### MAIMAN 1960

Maiman, T. H.: *Stimulated Optical Radiation in Ruby*. Nature, Band 187 1960, S. 493–494.

### MEISSNER ET AL. 2009

Meißner, N.; Wollnack, J.; Emmelmann, C.: *Sensor Guidance of Robot based Laser Remote Systems for Implementing the innovative Welding-on-the-fly Technology*. In: Ostendorf, A. (Hrsg.): 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2009. München, 15.-18. Juni 2009, ISBN: 978-3-00027-994-2, S. 333–338.

### MENIN 2002

Menin, R.: *Remote Laser Welding – The Comau Solution*. In: 10th Annual Automotive Laser Application Workshop, Michigan 2002. 12.-13. März 2002, S. 101–116.



MEYER 2011

Meyer, C.: *Aufnahme und Nachbearbeitung von Bahnen bei der Programmierung durch Vormachen von Industrierobotern*, Dissertation, Technische Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 507. Heimsheim: Jost-Jetter 2011, ISBN: 978-3-93989-075-1.

MUNZERT 2010

Munzert, U.: *Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen*, Dissertation, Technische Universität München (2009), Forschungsberichte *iwb*, Band 234. München: Utz 2010, ISBN: 978-3-83160-948-2.

MUSIOL ET AL. 2011

Musiol, J.; Zäh, M. F.; Guertler, M. R.: *Contribution on Modelling the Remote Ablation Cutting*. In: Washio, K. (Hrsg.): 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2011, Band 614 (104). Orlando, FL, USA, 23.-27. Oktober 2011, ISBN: 978-0-91203-594-9, S. 369–377.

MUSIOL ET AL. 2012

Musiol, J.; Lütke, M.; Schweier, M.; Hatwig, J.; Wetzig, A.; Beyer, E.; Zäh, M. F.: *Combining Remote Ablation Cutting and Remote Welding – Opportunities and Application Areas*. In: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Photonics West – Proceedings of LASE, 2012, Band 8239. San Fransico, CA, USA, 23.-27. Januar 2012.

NADERER 2010

Naderer, R.: *Anwendungen nachgiebiger Robotersysteme*. In: Hoffmann, H.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Münchener Kolloquium – Innovationen für die Produktion. München: Utz 2010. München, 6. Oktober 2010, ISBN: 978-3-83164-009-6, S. 77–85.

OEFELE 2012

Oefele, F.: *Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen*, Dissertation, Technische Universität München, Forschungsberichte *iwb*, Band 267. München: Utz 2012.

### OLSEN 2011

Olsen, F. O.: *Laser Cutting from CO<sub>2</sub>-Laser to Disc or Fiber Laser – Possibilities and Challenges*. In: Washio, K. (Hrsg.): 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2011, Band 614 (104). Orlando, FL, USA, 23.-27. Oktober 2011, ISBN: 978-0-91203-594-9, Paper #101.

### OTTO ET AL. 2011

Otto, A.; Koch, H.; Leitz, K.-H.; Schmidt, M.: *Numerical Simulations – A Versatile Approach for Better Understanding Dynamics in Laser Material Processing*. In: Schmidt, M. (Hrsg.): 6th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Physics Procedia 2011, Band 12 A. München, 23.-26. Mai 2011, S. 11–20, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211000824>, zuletzt geprüft am 13.04.2013.

### PETRING ET AL. 2005

Petring, D.; Schneider, F.; Benter, C.; Poprawe, R.: *The Combi-Head – Truly flexible Laser Processing by Cutting and Welding in a single Machine with a single Tool*. In: 24th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2005. Miami, CA, USA, 21.-24. September 2005, S. 91–95.

### PIHLAVA ET AL. 2010

Pihlava, A.; Purtonen, T.; Salminen, A.; Kujanpää, V.; Hartwig, L.; Schille, J.: *Quality of Remote Cutting*. In: Christensen, P.; Herman, P.; Patel, R. S. (Hrsg.): 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2010. Anaheim, CA, USA, 26.-30. September 2010, ISBN: 978-0-91203-561-1, Paper #905.

### POPRAWÉ 2005

Poprawe, R.: *Lasertechnik für die Fertigung – Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin: Springer 2005, ISBN: 3-54021-406-2.

REEK 2000

Reek, A.: *Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen*, Dissertation, Technische Universität München (1999), Forschungsberichte *iwb*, Band 138. München: Utz 2000, ISBN: 3-89675-730-x.

REINHART ET AL. 2008

Reinhart, G.; Munzert, U.; Vogl, W.: *A Programming system for Robot-based Remote-Laser-Welding with Conventional Optics Manufacturing Technology*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Band 57 2008 Heftnummer 1, S. 37–40.

REINHART ET AL. 2009

Reinhart, G.; Hatwig, J.; Kronthaler, M.; Musiol, J.: *Offline Nachteachen von Industrierobotern als Werkzeug in einer Simulationsumgebung*. In: Elst, G. (Hrsg.): Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen STS und GMMS, Dresdner Arbeitstagung Schaltungs- und Systementwurf DASS. Dresden: Fraunhofer-IRB-Verlag 2009. Dresden, 05.-06. März 2009, ISBN: 978-3-81677-981-0, S. 109–114.

RIPPL 1995

Rippl, P.: *Einsatzbeispiele zum Laserstrahlschweißen in der Fahrzeugfertigung mit Industrierobotern*. In: Milberg, J. (Hrsg.): Materialbearbeitung mit Laser – Von der Planung zur Anwendung. München: Utz 1995. München, 28. September 1995, ISBN: 3-93132-776-0, S. 51–68.

RIPPL 2006

Rippl, P.: *RoboScan – Der Industrieroboter als 6-Achs-Scanner für das Laserstrahlschweißen in Remote-Technik: Anwendungsbeispiele für die Zoomoptik und unterschiedliche feste Brennweiten*. In: 5. Laser-Anwenderforum, 2006. Bremen, 13.-14. September 2006, S. 93–101.

RIPPL 2007

Rippl, P.: *RoboSpin – Drehung der Servozange mittels Roboter um die Elektrodenachse in der Stromzeit – Eine neue Verfahrenstechnik beim automatisierten Punktschweißen zur Kostenreduktion und Qualitätsverbesserung*. In: Reisinger, U. (Hrsg.): Schweißtechnik und Fügetechnik – Schlüsseltechnologien der Zukunft – 10. Internationales

Aachener Schweißtechnik Kolloquium. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 978-3-83226-644-8, S. 379–392.

ROBERTSON & DOWLING 2003

Robertson, D. G. W.; Dowling, J. J.: *Design and Responses of Butterworth and critically damped digital Filters*. Journal of Electromyography and Kinesiology, Band 13 2003 Heftnummer 6, S. 569–573.

ROBOTMASTER 2012

RobotMaster: *Robotmaster – CAD/CAM für Roboter*, 2012, <http://www.robotmaster.de/>, zuletzt geprüft am 11.11.2012.

ROFIN GROUP 2013

Rofin Group: *Full House bei Strahlquellen*. Lasermarkt, Band 26 2013, S. 36–37.

SABIN & GRAY 1986

Sabin, M.; Gray, R.: *Global Convergence and Empirical Consistency of the Generalized Lloyd Algorithm*. IEEE Transactions on Information Theory, Band 32 1986 Heftnummer 2, S. 148–155.

SCHÄFER 1990

Schäfer, H.: *CAD-CAM-Planung langfristiger Gesamtkonzeptionen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990, ISBN: 3-18400-989-0.

SCHNEIDER ET AL. 2005

Schneider, F.; Petring, D.; Poprawe, R.: *Integrated Laser Processing – Cutting and Welding with a Combined Processing Head*. In: Beyer, E. (Hrsg.): 3rd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2005. München, 13.-16. Juni 2005, ISBN: 3-00011-673-7, S. 133–135.

SCHNEIDER ET AL. 2009

Schneider, F.; Petring, D.; Nazery, V.; Nüsser, C.: *2D and 3D Laser Cutting and Welding with the Combi-Head: Efficient Production by Flexible Process Changes*. In: Ostendorf, A. (Hrsg.): 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2009. München, 15.-18. Juni 2009, ISBN: 978-3-00027-994-2, S. 245–249.

SCHREIBER 2004

Schreiber, G.: *Steuerung für redundante Robotersysteme: Benutzer- und aufgabenorientierte Verwendung der Redundanz*. Dissertation, Universität Stuttgart. Stuttgart 2004, <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2186/pdf/schreiberDiss.pdf>, zuletzt geprüft am 27.04.2012.

SCHUTZRECHT DE10 2008 047 761 A1

Schutzrecht DE10 2008 047 761 A1: Patent (15.04.2010). TRUMPF Laser GmbH + Co. KG, Pr.: 10 2008 047 761, 2008-09-17. Schäfer, P.; Olschowsky, P.; Melbert, H.; Schwörer, T.: *Verfahren zum schneidgaslosen Laserschmelzschneiden*.

SCHWEIER ET AL. 2011

Schweier, M.; Hatwig, J.; Zäh, M. F.; Reppich, J.: *Single Mode Fiber Laser Beam Welding with Superposed Beam Oscillation*. In: Washio, K. (Hrsg.): 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2011, Band 614 (104). Orlando, FL, USA, 23.-27. Oktober 2011, ISBN: 978-0-91203-594-9, S. 536–546.

SIEMENS & HALSKE AG 1964

Siemens & Halske AG: *Taschenbuch für Elektromeßtechnik*. Karlsruhe 1964.

SNITZER 1963

Snitzer, E.: *Neodymium Glass Laser*. 3rd International Conference of Quantum Electron, Paris 1963, S. 999–1019.

STANDFUSS ET AL. 2010

Standfuß, J.; Klotzbach, A.; Heitmanek, M.; Krätzsche, M.: *Laser Beam Welding with High-Frequency Beam Oscillation: Welding of dissimilar Materials with brilliant Fiber Lasers*. In: 6th International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSC). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2010. Dresden, 05.-06. Oktober 2010, ISBN: 978-3-83960-197-6.

STEEN & MAZUMDER 2010

Steen, W. M.; Mazumder, J.: *Laser Material Processing*. 4. Auflage. London: Springer 2010, ISBN: 978-1-84996-061-8.

### STEMMANN 2006

Stemmann, J. M.: *Remote Welding with Solid State Lasers*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg (2005), Schriftenreihe Lasertechnik, Band 1. Göttingen: Cuvillier 2006, ISBN: 978-3-86537-820-0.

### STILES 2009

Stiles, E.: *Recent Progress in High Power Fiber Lasers*. In: 5. Internationaler Workshop Faserlaser. Dresden: Fraunhofer-IRB-Verlag 2009. Dresden, 30. September - 01. Oktober 2009, ISBN: 978-3-83960-062-7.

### STOCK ET AL. 2012

Stock, J.; Zäh, M. F.; Conrad, M.: *Remote Laser Cutting of CFRP: Improvements in the Cut Surface*. In: Schmidt, M.; Vollertsen, F.; Geiger, M. (Hrsg.): 7th Laser Assisted Net shape Engineering (LANE). Physics Procedia 2012, Band 39. Fürth, 12.-15. November 2012, S. 161–170, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212025539>, zuletzt geprüft am 13.04.2013.

### THIEME 2008

Thieme, J.: *Strahlqualität – Der Schlüssel zu neuen Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung*. In: Hoffmann, H. (Hrsg.): Münchener Kolloquium – Innovation für die Produktion. München: Utz 2008. München, 9. Oktober 2008, ISBN: 978-3-83160-844-7, S. 301–312.

### THOMY ET AL. 2004

Thomy, C.; Grupp, M.; Seefeld, T.; Sepold, G.; Vollertsen, F.: *CO<sub>2</sub>-Laser-Remoteschweißen Grundlagen, Prozessuntersuchungen und Anwendungen*. wt Werkstattstechnik online, Band 94 2004 Heftnummer 7/8, S. 373–378.

### TSOUKANTAS ET AL. 2008

Tsoukantas, G.; Stournaras, A.; Chrysosouris, G.: *Experimental Investigation of Remote Welding with CO<sub>2</sub> and Nd:YAG Laser-based Systems*. Journal of Laser Applications, Band 20 2008 Heftnummer 1, S. 50–58.

ULRICH 2006

Ulrich, C.: *Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen*, Dissertation, Technische Universität München, Forschungsberichte *iwb*, Band 196. München: Utz 2006, ISBN: 3-83160-590-4.

VÄNSKÄ ET AL. 2011

Vänskä, M.; Purtonen, T.; Salminen, A.: *Orbital Cutting and Welding of Stainless Steel Tubes with a Fiber Laser*. In: Washio, K. (Hrsg.): 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2011, Band 614 (104). Orlando, FL, USA, 23.-27. Oktober 2011, ISBN: 978-0-91203-594-9, S. 612–620.

VOGL 2009

Vogl, W.: *Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern*, Dissertation, Technische Universität München, Forschungsberichte *iwb*, Band 228. München: Utz 2009, ISBN: 978-3-83160-869-0.

VOGL & MUNZERT 2012

Vogl, W.; Munzert, U.: *Robot based Scanner Welding: Combining Efficiency and Flexibility*. In: European Automotive Laser Application (EALA). Hannover: Vincentz Network 2012. Bad Nauheim, 07. Februar 2012.

WEBER 2002

Weber, W.: *Industrieroboter – Methoden der Steuerung und Regelung*. 1. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig 2002, ISBN: 3-44621-604-9.

WECK & BRECHER 2006

Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen – Automatisierung von Maschinen und Anlagen*. 6. Auflage. Berlin: Springer 2006, ISBN: 978-3-54022-507-2.

WESTKÄMPER ET AL. 1998

Westkämper, E.; Schraft, R. D.; Schweizer, M.; Herkommer, T. F.; Meißner, A.: *Task-Oriented Programming of Large Redundant Robot Motion*. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, Band 14 1998, S. 363–375.

YAZOVSKIKH ET AL. 1995

Yazovskikh, V. M.; Belen'kii, V. Y.; Ol'shanskaya, T. V.: *Electron Beam Welding with Beam Oscillations along the X-Shaped Trajectory*. Welding International 9:2 1995, S. 139–142.

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M. F.; Munzert, U.; Oefele, F.: *Robot based Remote-Laser-Welding without Scanner Optics*. In: Vollertsen F (Hrsg.): 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2007. München, 18.-22. Juni 2007, ISBN: 978-3-00021-449-3, S. 429–436.

ZÄH ET AL. 2008

Zäh, M. F.; Oefele, F.; Munzert, U.; Hatwig, J.; Musiol, J.: *Robot based Remote-Laser-Welding with an 8 kW Fibre Laser*. In: Rosanov, N. (Hrsg.): 13th International Conference Laser Optics, 2008. St. Petersburg, Russland, 23.-28. Juni.

ZÄH ET AL. 2009

Zäh, M. F.; Musiol, J.; Schober, A.; Oefele, F.: *Heat induced Distortion during Remote Laser Cutting*. In: Ostendorf, A. (Hrsg.): 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). Stuttgart: AT-Fachverlag 2009. München, 15.-18. Juni 2009, ISBN: 978-3-00027-994-2, S. 227–232.

ZÄH ET AL. 2010a

Zäh, M. F.; Hatwig, J.; Musiol, J.; Rösch, O.; Reinhart, G.: *Analysis of the Accuracy of Industrial Robots and Laser Scanners for Remote Laser Beam Welding and Cutting*. In: 41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). Berlin: VDE 2010. München, 07.-09. Juni 2010, ISBN: 978-3-80073-273-9, S. 751–758.



ZÄH ET AL. 2010b

Zäh, M. F.; Mösel, J.; Musiol, J.; Oefe, F.: *Material Processing with Remote Technology – Revolution or Evolution?* In: Schmidt, M.; Vollertsen, F.; Geiger, M. (Hrsg.): 6th Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE). Bamberg: Meisenbach 2010. Erlangen, 21.-24. September 2010, S. 19–33, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389210005456>, zuletzt geprüft am 29.06.2013.

ZÄH ET AL. 2010c

Zäh, M. F.; Musiol, J.; Mösel, J.: *Methodical Qualification of Scanner Systems for Remote Laser Cutting*. In: Christensen, P.; Herman, P.; Patel, R. S. (Hrsg.): 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando: Laser Institute of America 2010. Anaheim, CA, USA, 26.-30. September 2010, ISBN: 978-0-91203-561-1, Paper #906.



## Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Der Autor der vorliegenden Dissertation hat in den Jahren von 2008 bis 2013 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) betreut. In diesen Studienarbeiten wurden u. a. verschiedene Methoden für die einzelnen Bahnplanungsschritte programmiert und getestet sowie Versuchsstände aufgebaut. Die entstandenen Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studenten für ihre Unterstützung bei dieser wissenschaftlichen Arbeit sowie beim Forschungsprojekt RoboLaSS und wünscht ihnen alles Gute in ihrer beruflichen Laufbahn als Ingenieur.

Student	Studienarbeit
Bayerlein, Fabian	<i>Realisation des On-the-Fly Remote-Laserstrahlschweißens</i> , abgegeben im Dezember 2012, eingeflossen in Abschnitt 5.3.2, in Abschnitt 5.4.2 und in Abschnitt 6.1.3
Cesmeci, Denis	<i>Konzeption und Aufbau eines Demonstratorbauteils für das robotergeführte Remote-Laserstrahlschneiden</i> , abgegeben im Oktober 2010, eingeflossen in Abschnitt 5.3.1 und in Abschnitt 5.4.1
Minnerup, Pascal	<i>Automated Motion Planning for Industrial Robots and Laser Scanners for Remote Laser Beam Welding and Cutting</i> , abgegeben im August 2010, eingeflossen in Abschnitt 5.3.1

## Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

---

- |                 |   |
|-----------------|---|
| Mletzko, Thomas | <i>Analyse und Bearbeitung von komplexen Aufgaben beim Remote-Laserstrahlschweißen und -schneiden</i> , abgegeben im Mai 2013, eingeflossen in Abschnitt 5.1.1 und in Abschnitt 6.1.2 |
| Shen, Sheng     | <i>Offline-Nachteachen als Werkzeug in einer Simulationsumgebung</i> , abgegeben im Oktober 2009, eingeflossen in Abschnitt 4.3.3   |
| Zhang, Meng     | <i>Automatische Aufgabenklassifizierung bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung</i> , abgegeben im April 2012, eingeflossen in Abschnitt 5.2.2  |

Weitere vom Autor betreute Studienarbeiten wurden von Ahmed Borhan, Thomas Forstner, Maximilian Frost, Caroline Jekelius, Johannes Kellner, Michael Kiefer, Martin Lohmann, Manh Tu Nguyen, Thomas Menauer, Stefan Mühlbauer, Shaofan Zhang und Xiaoqing Zhang erstellt und haben zusammen mit den vom Autor betreuten Hilfswissenschaftlerinnen und Hilfswissenschaftlern (HiWi) Ilirjan Berisha, Johannes Casper, Christian Fetscher, Renata Gajewskaja, Thomas Menauer, Michael Sauer, Denise Schmitt, Per Schreiber und Georg Winter zur Validierung von wichtigen Zwischenschritten beigetragen oder haben mit ihren Tätigkeiten den Autor bei seinen Aufgaben am *iwb* tatkräftig unterstützt.

# Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag  
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen  
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien  
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge  
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen  
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand  
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt  
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspansung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag,  
Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden  
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heilmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schliffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmekanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilerstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fahrer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräserter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingner:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohn:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9



- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgessysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eirener:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schickenrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrensbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmekanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transientser Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungsoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettsbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettsbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schweißgrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sanja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das lasterunterstützte Fräsen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irrenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spannenden Werkzeugmaschinen  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7

