

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen

Ulrich Munzert

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. Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr. Jochen Pfalzgraf,
Universität Salzburg / Österreich

Die Dissertation wurde am 28.01.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 03.06.2009 angenommen.

Ulrich Munzert

**Bahnplanungsalgorithmen für das
robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 234

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2009

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 · 2010

ISBN 978-3-8316-0948-2

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

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.

Vorwort

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

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Pfalzgraf, dem stellvertretenden Fachbereichsleiter des Lehrstuhls für Wissensbasierte und Lernende Systeme an der Universität Salzburg, möchte ich mich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit bedanken. Für die Übernahme des Vorsitzes bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz Ulbrich, dem Lehrstuhlinhaber für Angewandte Mechanik am Institut für Mechatronik der Technischen Universität München.

Bei Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Vogl möchte ich mich für die vielen konstruktiven Beiträge zu dieser Arbeit und für die Korrektur des Manuskripts bedanken. Für wertvolle technische Anregungen bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Dr. Uwe Zimmermann und Herrn Dipl.-Tech. Math. Christian Sonner. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des *iwb* sowie bei allen Studentinnen und Studenten bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

Meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht und mich immer motiviert haben, möchte ich in besonderer Weise danken. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

München im Mai 2010

Ulrich Munzert

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Formelzeichen und Abkürzungen	XI
Formelzeichen.....	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Laserstrahlschweißen in der industriellen Fertigung	1
1.2 Steigerung der Anlagenproduktivität durch Erhöhung der Brennweite ..	3
1.3 Problematik der zeitoptimalen Programmierung.....	4
1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	6
2 Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung beim RLS	9
2.1 Kapitelübersicht	9
2.2 Definition des Redundanzbegriffs.....	9
2.3 Manipulatorische Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung	10
2.3.1 Komponentenüberblick.....	10
2.3.2 Strahlpositioniersysteme roboterbasierter Remote-Anlagen	12
2.4 Dimension des Ergebnisraums beim Laserstrahlschweißen	15
2.4.1 Prozessparameter und Kenngrößen des Schweißprozesses	15
2.4.2 Abweichungen der Lage und Orientierung des Brennflecks.....	16
2.4.2.1 Vorbemerkungen	16
2.4.2.2 Translatorische Abweichungen	18
2.4.2.3 Rotatorische Abweichungen.....	23
2.5 Zusammenfassung.....	25
3 Stand der Technik zur Programmierung von Robotersystemen	27
3.1 Kapitelübersicht	27

3.2	Grundlagen der Industrierobotik.....	27
3.2.1	Definition und Bauformen von Industrierobotern.....	27
3.2.2	Steuerungstechnischer Aufbau	28
3.2.3	Lagebeschreibung von Manipulatoren	30
3.2.3.1	Koordinatensysteme und Beschreibungsräume	30
3.2.3.2	Vorwärtstransformation	31
3.2.3.3	Rückwärtstransformation	34
3.3	Programmierung von Industrierobotern.....	40
3.3.1	Ziele und Inhalte der Programmierung.....	40
3.3.2	Konventionelle Programmierung und Bewegungsoptimierung	42
3.3.3	Automatische Bahnplanung und –optimierung	44
3.3.3.1	Vorbemerkungen.....	44
3.3.3.2	Globale Bahnplanung.....	45
3.3.3.3	Lokale Bahnplanung	46
3.4	Fazit und Handlungsbedarf.....	48
4	Bahnplanungsalgorithmen für Remote-Anlagen mit Optiken fester Brennweite.....	51
4.1	Konzept der Optimierung	51
4.1.1	Vorüberlegung und Optimierungsansatz.....	51
4.1.2	Überblick zu den Teilverfahren.....	53
4.2	Datenmodelle	54
4.2.1	Modell der Schweißaufgabe.....	54
4.2.2	Modell des Schweißroboters	57
4.2.3	Werkzeugmodell.....	59
4.3	Ermittlung einer geeigneten Startlösung.....	59
4.3.1	Allgemeines	59
4.3.2	Problematik bei der Ermittlung einer Startlösung.....	59
4.3.3	Bestimmung der Bahn des TCPF	61
4.3.3.1	Einordnung und Komplexität der Fragestellung	61
4.3.3.2	Methodik zur Approximation des kürzesten TCPF- Pfades	63

4.3.3.3	Leistungsfähigkeit des Verfahrens	65
4.3.4	Zuweisung der Einstrahlwinkel	68
4.3.4.1	Vorüberlegung.....	68
4.3.4.2	Prinzip des Verfahrens	68
4.4	Verfahren zur Verkürzung und Glättung des Optikpfades	71
4.4.1	Allgemeines	71
4.4.2	Verkürzung des Optikpfades	72
4.4.2.1	Beurteilung des bisherigen Ergebnisses	72
4.4.2.2	Prinzip des Verfahrens	72
4.4.3	Glättung des Optikpfades.....	75
4.4.3.1	Beurteilung des bisherigen Ergebnisses	75
4.4.3.2	Prinzip des Verfahrens	76
4.5	Strahlorientierung und Geschwindigkeitsglättung.....	78
4.5.1	Bestimmung der Optikorientierung um die Strahlachse.....	78
4.5.1.1	Beurteilung des bisherigen Ergebnisses	78
4.5.1.2	Prinzip des Verfahrens	80
4.5.2	Anpassung der Optikgeschwindigkeit	81
4.5.2.1	Beurteilung des bisherigen Bahnverlaufs.....	81
4.5.2.2	Prinzip des Verfahrens	81
4.6	Leistungsfähigkeit der Algorithmen	85
5	Bahnplanungsalgorithmen für Anlagenkonzepte mit Zoomoptiken	89
5.1	Übertragbarkeit der Algorithmen.....	89
5.2	Konzept der Optimierung.....	90
5.2.1	Optimierungsansatz	90
5.2.2	Überblick zu den Teilverfahren	91
5.3	Generierung eines initialen Handwurzelpunktpfades	93
5.4	Bahn- und Geschwindigkeitsglättung des Handwurzelpunktpfades.....	95
5.5	Leistungsfähigkeit des Gesamtverfahrens.....	98
6	Beschreibung des Einsatzes der Algorithmen	101
6.1	Kapitelübersicht	101

6.2	Konzeption eines aufgabenorientierten Programmiersystems.....	101
6.3	Anwendungsbeispiel: Vergleich von Maschinenkonzepten.....	104
6.3.1	Charakterisierung des Anwendungsbeispiels.....	104
6.3.2	Aufgabenbeschreibung innerhalb einer 3D-Umgebung.....	106
6.3.3	Ergebnisse.....	108
6.4	Anwendungsbeispiel: Programmierung einer Remote-Anlage.....	110
6.4.1	Charakterisierung des Anwendungsbeispiels.....	110
6.4.2	Aufgabenbeschreibung am realen Bauteil.....	112
6.4.3	Ergebnisse.....	114
7	Technische und wirtschaftliche Bewertung	117
7.1	Kapitelübersicht.....	117
7.2	Technische Bewertung.....	117
7.3	Wirtschaftliche Bewertung.....	120
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	123
9	Literaturverzeichnis	127

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Füge- und Positionierzeitanteile bei unterschiedlichen Fügeverfahren (nach PAURA 2005).....	2
Abbildung 2:	Vorteil des Remote-Laserstrahlschweißens: Höhere Versatzgeschwindigkeit bei gleichem Versatzwinkel	4
Abbildung 3:	Problematik bei der taktzeitoptimalen Programmierung von Remote-Laseranlagen. Aufgrund der manipulatorischen und prozessspezifischen Freiheitsgrade sind unendlich viele Bewegungsbahnen der Schweißoptik realisierbar. Für jede Bahn benötigt der Roboter eine bestimmte Zeit zum Durchfahren.	6
Abbildung 4:	Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 5:	Komponenten von Remote-Laseranlagen. Hervorzuheben ist dabei die Integration der Funktionen „Strahlformung“ und „Strahlableitung“ in der Komponente „Werkzeug“. Zusammen mit der Handhabungseinrichtung bilden sie das „Strahlpositioniersystem“ (in Anlehnung an DIN EN ISO 11145 (2006)).....	11
Abbildung 6:	Darstellung der wichtigsten roboterbasierten Strahlpositionierkonzepte für die Remote-Bearbeitung (2, 3 und 4) im Vergleich zur konventionellen Strahlführung (1). Während (2) lediglich eine größere Brennweite aufweist, verfügen die Konzepte (3) und (4) über zusätzliche Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung.....	14
Abbildung 7:	Randbedingungen und Parameter beim Laserstrahlschweißen .	16
Abbildung 8:	Mögliche Abweichungen bei der Positionierung eines Laserstrahls (Index L) bezüglich einer Sollposition (Index S)..	17
Abbildung 9:	Wichtige Größen bei der Fokussierung von Laserstrahlung nach HERING & MARTIN (2006)	19
Abbildung 10:	Unterteilung der Einstrahlwinkel in Abhängigkeit der Vorschubrichtung in Stechwinkel, Schleppwinkel sowie positive und negative Lateralwinkel.....	23

Abbildung 11: Penetrations- und Schweißnahttiefe beim Laserstrahlschweißen (nach GRUPP et al. 2003).....	24
Abbildung 12: Redundanzgrade verschiedener Remote-Anlagenkonzepte	26
Abbildung 13: Aufbau und Funktionsweise von Industrierobotersteuerungen	29
Abbildung 14: Betrachtungsräume und wichtige Koordinatensysteme von Manipulatoren. Bei der gezeigten Sechs-Achs-Knickarm-Roboterkinematik werden die Achsen A1-A3 (rechts) als Hauptachsen bezeichnet. Die Achsen A4-A6 bilden eine Zentralhand, deren Rotationsachsen sich in einem Punkt schneiden (Handwurzelpunkt).....	30
Abbildung 15: Ermittlung der DH-Parameter für einen Beispielmanipulator...	32
Abbildung 16: Achskonfigurationen für gegebene Positionen und Arbeitsraum eines Manipulators mit drei Gelenken.....	35
Abbildung 17: Abgrenzung der Begriffe Aufgaben-, Pfad- und Trajektorienplanung anhand eines Beispiels. Alle drei Teilbereiche bilden zusammen die Aufgaben der Roboterprogrammierung.	41
Abbildung 18: Taktzeitverbesserung durch Verkürzung und Glättung des Bewegungspfades zwischen zwei Punkten A und B bei Werkzeugen mit kleinen Abmessungen	43
Abbildung 19: Veranschaulichung der Grundidee zur Bestimmung von taktzeitoptimalen Roboterbahnen für das RLS mit Optiken fester Brennweite. Durch Verkürzung und Glättung des Pfades des Optikscherpunktes wird eine hauptachsengestützte Vorpositionierung in Verbindung mit einer schnellen Versatzbewegung durch die Handachsen angestrebt.....	52
Abbildung 20: Teilschritte zur Optimierung von Roboterbewegungsbahnen für Remote-Anlagen mit Optiken fester Brennweite.....	53
Abbildung 21: Konventionen und Beschreibungsformen zur Aufgabenmodellierung	55

Abbildung 22: Dreidimensionale Darstellung gültiger Einstrahlwinkelbereiche für einen Schweißpunkt. Die Ausrichtung erfolgt anhand des Aufgabenframes. Die sphärische Oberfläche des Schweißkegels repräsentiert den Raum möglicher Aufenthaltsorte des Schweißoptikschwerpunkts.....	56
Abbildung 23: Datenmodell einer Schweißaufgabe	57
Abbildung 24: Datenstruktur zur Beschreibung eines Roboters.....	58
Abbildung 25: Datenstruktur zur Beschreibung einer Schweißoptik mit Festbrennweite	59
Abbildung 26: Beispiel eines TSP mit drei abzufahrenden Orten. Im linken Beispiel werden die Orte als Punkte interpretiert. Dieser Fall wird auch als symmetrisches TSP bezeichnet. Für dieses Beispiel existieren 6 mögliche Kombinationen. Im rechten Beispiel werden die abzufahrenden Orte als Schweißnähte dargestellt, die beliebig in die eine oder andere Richtung geschweißt werden können. In diesem Fall ergeben sich bereits 48 Kombinationsmöglichkeiten. Er wird als asymmetrisches TSP bezeichnet.	62
Abbildung 27: Methodik zur Berechnung einer möglichst kurzen Bahn des TCPF für eine Schweißaufgabe	63
Abbildung 28: Reduktion der Gesamtlänge des Hamiltonkreises in Abhängigkeit der Zahl der Suchläufe des Verfahrens für ein Schweißbeispiel mit 34 Schweißnähten. Die drei Bilder zeigen eine zufällig gewählte Startreihenfolge (links), die gefundene Reihenfolge nach 400 Durchläufen (Mitte) und nach 2000 Durchläufen (rechts). Die Berechnungszeit bis zum Abbruch bei 2000 Iterationen betrug dabei 4,5 s.....	66
Abbildung 29: Vergleichende Untersuchung zur Bestimmung der Güte der k-Opt-Heuristik (Nähte als Punkte abstrahiert)	67
Abbildung 30: Vergleichende Untersuchung zur Bestimmung der Güte des Gesamtverfahrens	67

Abbildung 31: Verfahren zur Ermittlung aller gültigen Frames für alle Stützpunkte der Nahtelemente.....	69
Abbildung 32: Ermittlung gültiger Einstrahlwinkel zur Generierung des initialen Optikpfades. Für jeden Schweißkegel werden Punktmuster generiert, die auf ihre Erreichbarkeit hin überprüft werden. Im linken Bild sind gültige Positionen der Schweißoptik als Kreise markiert. Daraus wird eine als Startposition der Optik bestimmt (ausgefüllter Kreis). Durch das Verbinden aller derart bestimmten Punkte in der durch die TCPF-Bahn vorgegebenen Reihenfolge ist die Startlösung der Optikscherpunktsbahn definiert (rechts).	70
Abbildung 33: Verfahren zur iterativen Verkürzung der Optikscherpunktsbahn	73
Abbildung 34: Wirkungsweise des Teilverfahrens zur Verkürzung des Optikpfades.....	75
Abbildung 35: Iterativen Glättung der Optikbahn mit dem Prinzip des „Gummibandes“	77
Abbildung 36: Wirkungsweise des Teilverfahrens zur Glättung des Optikpfades anhand eines Beispiels mit 34 Schweißnähten....	78
Abbildung 37: Roboterposen unter Beibehaltung des Einstrahlwinkels	79
Abbildung 38: Verfahren zur Bestimmung der Orientierung der Optik in Strahlrichtung	80
Abbildung 39: Geschwindigkeit des Werkzeugs über dem Bauteil bei einer Schweiß- und bei einer Versatzbewegung. Ein ungünstiges Verhältnis (links) resultiert in einem hohen Geschwindigkeitssprung der Hauptachsen. Durch geeignete Anpassung der Stützpunkte (rechts) kann eine gleichmäßigere Verteilung erreicht werden.	82
Abbildung 40: Geschwindigkeitsverlauf der Roboterachsen für ein Schweißbeispiel mit 4 Nähten mit und ohne Anpassung der Optikgeschwindigkeiten	84

Abbildung 41:	Leistungsfähigkeit der entwickelten Teilverfahren; die verwendeten Schweißmuster sind in Abbildung 32 (12 Nähte) und in Abbildung 36 (34 Nähte) visualisiert.	85
Abbildung 42:	Verläufe aller Roboterachswinkel für ein Beispiel mit 34 Schweißnähten (siehe Abbildung 41) nach der Anwendung des jeweiligen Optimierungsschrittes	86
Abbildung 43:	Datenstruktur zur Beschreibung einer Laserschweißoptik mit zusätzlichem Freiheitsgrad zur Fokuspositionierung in Strahlrichtung.....	89
Abbildung 44:	Teilschritte zur Optimierung von Roboterbewegungsbahnen für Remote-Anlagen mit Zoomoptiken.....	92
Abbildung 45:	Zweistufiges Verfahren zur Ermittlung einer initialen Handwurzelpunktbahn	94
Abbildung 46:	Prinzip zur Ermittlung einer initialen Handwurzelpunktbahn für die gegebenen Optikscherpunkte	95
Abbildung 47:	Wirkungsweise des Teilverfahrens zur Glättung des Handwurzelpunktpfades, illustriert an einem Beispiel mit 34 Schweißnähten	96
Abbildung 48:	Geschwindigkeitsverlauf der Roboterachsen für ein Beispiel mit 4 Nähten (Achse 4 ohne Bewegungsanteile). Im Vergleich zum RLS mit Festoptiken (siehe Abbildung 40) kann die Geschwindigkeit der Hauptachsen deutlich effektiver geglättet werden. Das Verfahren erreicht für dieses Beispiel eine Taktzeiteinsparung von 220 ms (4,5%). ...	97
Abbildung 49:	Erreichbare Taktzeiten für die verschiedenen Anlagen- und Optimierungskonzepte für zwei Schweißbeispiele.....	99
Abbildung 50:	Einsatz der Optimierungsalgorithmen innerhalb eines aufgabenorientierten Programmiersystems.....	103
Abbildung 51:	3D-Modelle der wichtigsten Komponenten der projektierten Remote-Laserstrahlschweißanlage	105
Abbildung 52:	Charakteristik der Schweißaufgabe und der beiden projektierten Maschinenkonfigurationen	106

Abbildung 53: Erweiterung der Robotersimulationsumgebung Robcad durch ein Modul zur aufgabenorientierten Programmierung von Remote-Schweißaufgaben	107
Abbildung 54: Anpassung des Einstrahlwinkelbereichs aufgrund von Abschattungen durch die Spannvorrichtung	108
Abbildung 55: Ergebnisse des Einsatzes der Optimierungsalgorithmen und des aufgabenorientierten Programmiersystems für das Anwendungsbeispiel.....	109
Abbildung 56: Verwendete Anlagentechnik (Quelle: RIPPL 2008).....	111
Abbildung 57: Charakteristik der beiden Schweißaufgaben und der verwendeten Remote-Anlage	111
Abbildung 58: Komponenten und Funktionsweise des interaktiven Programmiersystems (nach ZAEH & VOGL 2006)	112
Abbildung 59: Kalibrierung des intuitiven Eingabesystems (links) und Definition von Schweißnähten am realen Bauteil (rechts).....	113
Abbildung 60: Aufwände und Ergebnisse zur Programmierung des Anwendungsbeispiels (jeweils separat für jedes Bauteil)	114
Abbildung 61: Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von Optimierungsalgorithmen beim RLS.....	121

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Größe	Einheit	Beschreibung
α_i	rad	DH-Parameter, Verdrehung eines Kettengliedes eines Manipulators
a_i	mm	DH-Parameter, Länge eines Kettengliedes eines Manipulators
${}^{i-1}_i A$	-	DH-Matrix
C	-	Transformation einer entkoppelbaren Teilkette eines Manipulators
d_0	mm	Durchmesser eines Laserrohstrahls
d_i	mm	DH-Parameter, Verschiebung eines Gelenks eines Manipulators
d_f	mm	Durchmesser eines Laserstrahls im Brennpunkt
D	mm	Durchmesser eines Laserstrahls auf einer Fokussierlinse
D_f	N/m	Federkonstante
f_f	mm	Brennweite einer Linse
F	-	Fokussierzahl
F_f	N	Federkraft
G_a, G_b	-	Transformationen für Teilketten eines Manipulators
I	-	Identitätsmatrix
J	-	Jacobi-Matrix
J^+		Moore-Penrose-Pseudoinverse der Jacobi-Matrix J
K	-	Strahlpropagationsfaktor
λ	nm	Wellenlänge
l_1, l_2, l_3	mm	Variablen für Längen
m	-	Dimension des Ergebnisraums

m_a	-	Dimensionen einer Aufgabenstellung
m_s	-	Dimensionen des Ergebnisraums in einer degenerierten Stellung
M^2	-	Beugungsmaßzahl
n	-	Anzahl der kinematischen Freiheitsgrade eines Systems
\bar{q}	-	Vektor, dessen Elemente aus Achswinkeln bestehen
q_i	rad	Achswinkel eines Manipulators am Gelenk i
θ_0	mrad	Divergenzwinkel eines Laserrohstrahls
θ_i	rad	DH-Parameter, Winkel eines Gelenks eines Manipulators
θ_f	mrad	Divergenzwinkel eines fokussierten Laserstrahls
r	-	Grad der Redundanz eines Systems
SPP	mm*mrad	Strahlparameterprodukt eines Laserstrahls
SPP_{00}	mm*mrad	Strahlparameterprodukt eines Laserstrahls in der Grundmode (idealer Laserstrahl)
${}^{i-1}T$	-	Transformationsmatrix eines Robotergelenks i bezogen auf das Gelenk $i-1$
v	-	allgemeiner Vektor
x_x, x_y, x_z	-	Vektorkomponenten
y_x, y_y, y_z	-	Vektorkomponenten
z_x, z_y, z_z	-	Vektorkomponenten
z_R	mm	Rayleighlänge
Δz	mm	Tiefenschärfe
X, Y, Z	-	Achsbezeichnungen bei Koordinatensystemen
$\Delta X_l, \Delta X_r$	mm bzw. rad	Translatorische (Index l) bzw. rotatorische (Index r) Abweichung in Richtung der X-Achse zwischen einer Schweißposition und einem Laserstrahl

$\Delta Y_t, \Delta Y_r$	mm bzw. rad	Translatorische (Index t) bzw. rotatorische (Index r) Abweichung in Richtung der Y-Achse zwischen einer Schweißposition und einem Laserstrahl
$\Delta Z_t, \Delta Z_r$	mm bzw. rad	Translatorische (Index t) bzw. rotatorische (Index r) Abweichung in Richtung der Z-Achse zwischen einer Schweißposition und einem Laserstrahl

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	dreidimensional
API	Application Programming Interface, Schnittstelle zur Programmierung einer Anwendung in einem Grundsystem
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CO ₂	Kohlendioxid
DH	Denavit-Hartenberg
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
engl.	englisch
FEM	Finite-Elemente-Methode
i. d. R.	in der Regel
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (der Technischen Universität München)
kW	Kilowatt
Mrd.	Milliarde
PC	engl.: Personal Computer

Pkw	Personenkraftwagen
PTP	Point-to-Point, Punkt zu Punkt
RLS	Remote-Laserstrahlschweißen
SCARA	Selective compliance assembly robot arm
SPP	Strahlparameterprodukt
TCPF	Tool-Center-Point-Frame, Wirkort des Werkzeuges
TEM ₀₀ - Mode	Transversal elektro-magnetisch, Grundmode
TSP	Travelling Salesman Problem, Problem des Handlungsreisenden
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Laserstrahlschweißen in der industriellen Fertigung

In der industriellen Produktion hat sich die Lasertechnik als ein wichtiges Werkzeug in vielen Bereichen der Fertigung etabliert. Nach MAYER (2007) konnte die Branche der optischen Technologien durch die Erschließung neuer Anwendungsbereiche durchschnittliche jährliche Zuwachsraten von 13,5% in den letzten 10 Jahren und ein Marktvolumen für Lasersysteme von 6,1 Mrd. Euro im Jahr 2006 für sich verbuchen. Dies entspricht einem Zuwachs von 27% im Vergleich zum Jahr 2005. Zu Recht wird die Lasertechnik daher auch als Wachstums- und Schlüsseltechnologie bezeichnet (SCHMITZ 2004, KRAUS 2005).

Eines der wichtigsten Einsatzgebiete der Lasertechnik in der Fertigung ist neben dem Schneiden, dem Gravieren oder der Mikrobearbeitung das Verschweißen von Bauteilen mittels Laserstrahlung. Der Begriff „Laserstrahlschweißen“ charakterisiert ein Fügeverfahren, bei dem durch das lokale Aufschmelzen und die anschließende Abkühlung eine unlösbare Verbindung zwischen den Fügepartnern erzeugt wird. Die Erwärmung entsteht dabei durch die Absorption gebündelter elektromagnetischer Strahlung bei deren Auftreffen auf und beim Eindringen in das Werkstück. Entsprechend wird das Verfahren der Kategorie „*Schmelz-Verbindungsschweißen durch Strahl*“ nach der Einteilung in der DIN 8593-6 (1985) zugeordnet.

Das Laserstrahlschweißen zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität, eine hohe Prozessgeschwindigkeit und durch herausragende Schweißnahteigenschaften bei gleichzeitig geringem Wärmeeintrag aus (DILTNEY 2005, S. 182). Dadurch konnte sich dieses Verfahren einen festen Platz in wichtigen Branchen, wie dem Fahrzeug- und Anlagenbau sowie in der Elektronikfertigung und Feinwerktechnik, sichern (OTTO & HOHENSTEIN 2007). In der Automobilindustrie wurde das Potential der Lasertechnik zur Substitution des Widerstandspunktschweißens im Karosseriebau erkannt. Die Widerstandsschweißpunkte werden dabei durch kurze lasergeschweißte Nahtelemente (so genannte Steppnähte) ersetzt. Dadurch kann der Wärmeeintrag und damit der thermisch induzierte Bauteilverzug im Vergleich zu langen, durchgezogenen Schweißnähten gering gehalten werden. Steppnähte weisen im Bezug auf die Bruch- und Dauerfestigkeit Vorteile gegenüber Punktschweißungen auf, wodurch die Steifigkeit von Karosseriestrukturen verbessert werden kann (EMMELMANN 2005).

Wie das in der Abbildung 1 veranschaulichte Ergebnis einer Studie der Volkswagen AG zeigt, bietet das Laserstrahlschweißen neben den genannten prozessspezifischen Vorteilen ein Einsparungspotential bezüglich der Taktzeit¹ von bis zu 50% im Vergleich zu Alternativverfahren. Die Einsparung ergibt sich zum einen aus der kürzeren Zeit pro Fügevorgang, zum anderen aus der Reduktion der Zeit zur Positionierung des Werkzeuges zwischen zwei Fügestellen. Die Verkürzung der Positionierzeit resultiert daraus, dass beim Laserstrahlschweißen nur eine einseitige Zugänglichkeit zum Werkstück gegeben sein muss. Dadurch entfallen das langwierige Umfahren des Bauteils und das Einfädeln des Werkzeugs, wie es beim Punktschweißen oder dem Clinchen notwendig ist. Welches Potential die Lasertechnik dadurch allein für die Automobilindustrie bietet, wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass jedes der jährlich weltweit produzierten 55 Millionen Fahrzeuge mit durchschnittlich 3000 Widerstandsschweißpunkten gefertigt wird (EMMELMANN 1999).

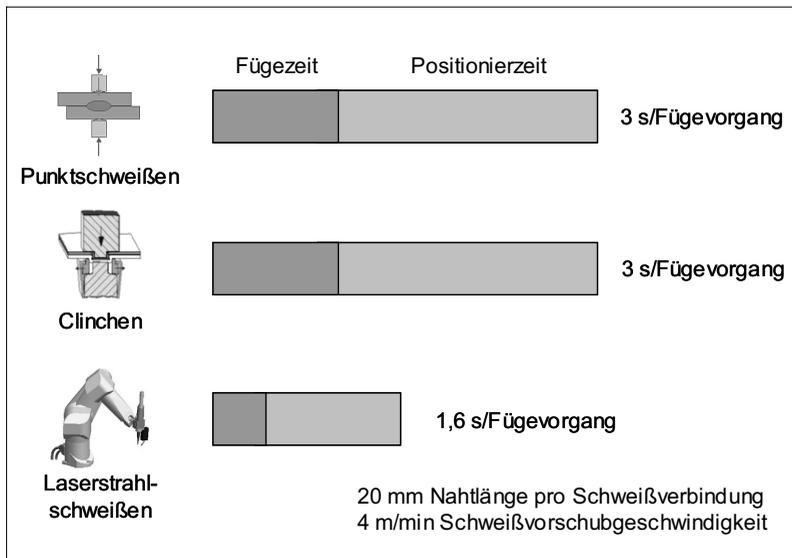


Abbildung 1: Füge- und Positionierzeitanteile bei unterschiedlichen Fügeverfahren (nach PAURA 2005)

¹ Die Taktzeit - auch Arbeitstakt oder Takt genannt - ist die Zeit, in der jeweils eine Mengeneinheit fertiggestellt wird (nach REFA 1985, S. 282).

Trotz dieser enormen Vorteile konnte das Laserstrahlschweißen sein volles Potential zur Substitution von langsameren Alternativverfahren noch nicht ausschöpfen. Der Hauptgrund dafür ist in der bislang nicht durchgängig ausreichenden Wirtschaftlichkeit von Laserschweißanlagen zu suchen. Nach EMMELMANN (1999) liegen die Investitionskosten für robotergeführte Laserstrahlschweißsysteme um den Faktor 10 bis 100 höher, als bei vergleichbaren Widerstandspunktschweißanlagen. Bis zu 60% der Investitionskosten entfallen dabei allein auf die Strahlquelle (THUMM 2005).

1.2 Steigerung der Anlagenproduktivität durch Erhöhung der Brennweite

Ein Ansatz zur Steigerung der Produktivität von Laseranlagen ist die weitere Reduzierung der Positionierzeitanteile durch die Erhöhung der Brennweite des fokussierten Laserstrahls. Ermöglicht werden lange Arbeitsabstände durch eine hohe Qualität des Laserstrahls. Neue Strahlquellenkonzepte, wie beispielsweise der Faser- oder der Scheibenlaser, erzeugen Strahlung, die aufgrund der verbesserten Strahlqualität in einer Entfernung von bis zu 1000 mm bei hinreichend kleinem Brennfleckdurchmesser fokussiert werden kann. Dies ist notwendig, um eine ausreichend hohe Leistungsdichte zum Aufschmelzen des Werkstoffes im Brennfleck zu gewährleisten.

Der Vorteil von langen Brennweiten ist, dass eine Auslenkung des Laserstrahls zu einer deutlich größeren Versatzbewegung des Brennflecks führt (siehe Abbildung 2). Da die Auslenkungsgeschwindigkeit von dem eingesetzten Handhabungssystem limitiert wird, kann die mögliche Versatzgeschwindigkeit beim Sprung des Brennflecks zwischen zwei Schweißnähten durch lange Brennweiten deutlich erhöht werden (KIRCHHOFF & EMMELMANN 2007). Ein weiterer positiver Effekt bei der Verwendung von langen Brennweiten ist die Minimierung von Verunreinigungen der Schweißoptik durch Spritzer.

Dieser Technik, die auch als **Remote²-Laserstrahlschweißen** (RLS) bezeichnet wird, bescheinigen Anwender aus der Automobilindustrie ein enormes Potential zur Produktivitätssteigerung für das industrielle Fügen (HAMMER & BROCKMANN 2006, HORNIG 2002). Das Kunstwort „*Remote-Laserstrahlschweißen*“ charakterisiert dabei die Verwendung von Schweißanla-

² Remote: engl. für weit.

gen, die über Brennweiten von mehr als 300 mm verfügen (HAMMER & BROCKMANN 2006, THOMY et al. 2004). Bei Verwendung von Brennweiten unter 300 mm wird vom konventionellen Laserstrahlschweißen gesprochen.

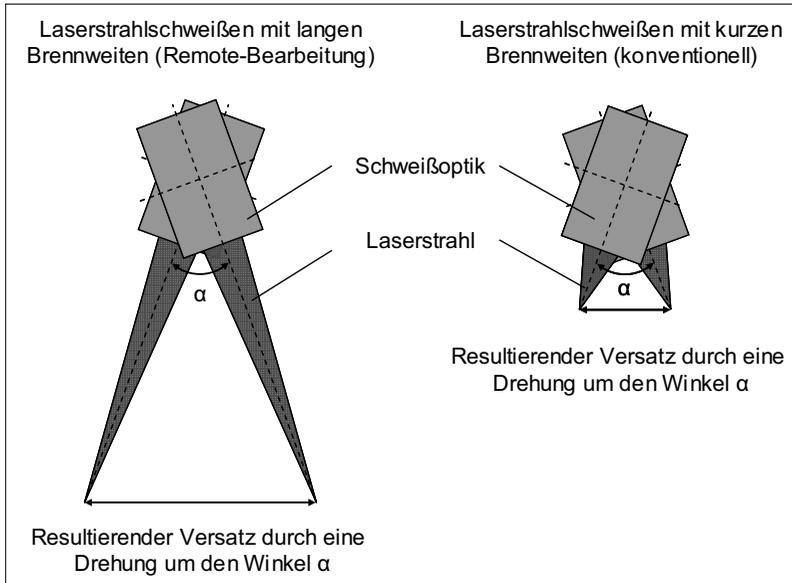


Abbildung 2: Vorteil des Remote-Laserstrahlschweißens: Höhere Versatzgeschwindigkeit bei gleichem Versatzwinkel

1.3 Problematik der zeitoptimalen Programmierung

Die Positionierung von Laserstrahlung erfolgt für 3D-Anwendungen üblicherweise durch einen Industrieroboter, der eine Schweißoptik relativ zum Bauteil bewegt. Industrieroboter verfügen im Regelfall über sechs einstellbare Achsen, die eine freie Positionierung der Lage und Orientierung des Brennflecks im Raum ermöglichen. Schweißoptiken für die Remote-Bearbeitung besitzen meist zusätzliche Mechanismen zur Strahlablenkung. Beispielsweise werden zur Verbesserung der 3D-Fähigkeit von Remote-Anlagen Optiken eingesetzt, die eine variable Einstellung der Brennweite ermöglichen. Damit verfügen Remote-Laseranlagen in der Regel über mehr als sechs manipulatorische Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung. Weitere Freiheitsgrade zur Positionierung des Laserstrahls resultieren aus der Toleranz des Schweißprozesses gegenüber Lage- und

Orientierungsvariationen. Beispielsweise können hochwertige Fügeverbindungen auch bei Einfallrichtungen der Laserstrahlung erzeugt werden, die nicht senkrecht zur Bauteiloberfläche liegen (OEFELE et al. 2008, KLING 2004).

Die Positionierung der Laserstrahlung am Bauteil kann somit durch eine Vielzahl an Freiheitsgraden realisiert werden, die sich sowohl aus der manipulatorischen Kette der Remote-Anlage als auch aus dem Schweißprozess ergeben. Damit ist die Zuordnung zwischen einer Nahtposition und den notwendigen Gelenkwinkelstellungen des Schweißroboters nicht eindeutig. Vielmehr existiert für eine gegebene Schweißnahtlage ein unendlich großer Lösungsraum zur Positionierung der Schweißoptik relativ zum Bauteil. Im Allgemeinen ist dieser Umstand für die Programmierung einer einzelnen Schweißnaht als sehr positiv zu bewerten, da sehr leicht **eine** gültige Roboterpose gefunden werden kann. Problematisch ist allerdings die Programmierung von komplexen Schweißaufgaben, bei denen die Taktzeit und damit die Zeit zur Positionierung des Brennflecks zwischen zwei Nahtelementen möglichst gering gehalten werden muss.

Da bereits für eine einzelne Nahtposition unendlich viele Optikpositionen eingestellt werden können, ergeben sich für mehrere Nahtelemente auch unendlich viele mögliche Bewegungsbahnen der Schweißoptik. Dies verdeutlicht Abbildung 3 anhand eines einfachen Schweißbeispiels, bei dem der Einstrahlwinkel und die Brennweite der Laserstrahlung innerhalb gewisser Grenzen variabel einstellbar sind. Für jede gewählte Lösung beansprucht der Schweißroboter eine bestimmte Zeit zum Abfahren der Bewegungsbahn.

Die Programmierung von Remote-Anlagen stellt heute den Anwender vor eine enorme Herausforderung. Zwar ist es, wie oben erläutert, aufgrund des unendlich großen Lösungsraums relativ einfach, **eine** Bewegungsbahn zu programmieren. Dies garantiert allerdings nicht, die Verschweißung in der kleinsten möglichen Zeit herzustellen. Zur Verbesserung der Taktzeit stehen heute lediglich sehr eingeschränkte Methoden zur Verfügung. Diese basieren im Wesentlichen darauf, Bewegungsbahnen durch die manuelle Modifikation von einzelnen Stützpunkten sukzessive zu verbessern. Für komplexe industrielle Schweißaufgaben, die üblicherweise aus 50 und mehr Schweißnähten bestehen, sind diese konventionellen Programmiermethoden jedoch ungeeignet und garantieren nicht die Ermittlung von zeitoptimalen Bewegungsbahnen.

Im industriellen Umfeld, welches fast ausschließlich durch manuelle Roboterprogrammierung mit konventionellen Methoden gekennzeichnet ist, besteht daher

ein enormer Bedarf, die Planung und Optimierung einer Roboterbewegung für das RLS soweit wie möglich zu automatisieren. Dazu sind Berechnungsalgorithmen notwendig, die zeitoptimale Bewegungsbahnen ermitteln können.

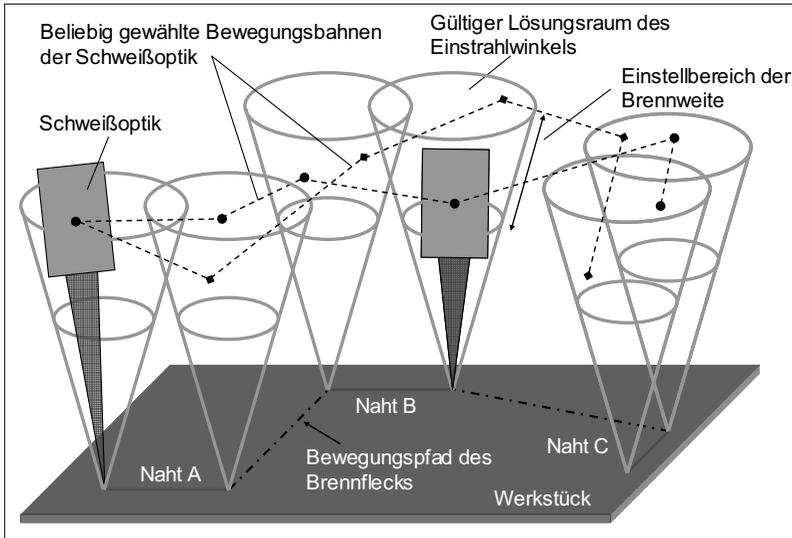


Abbildung 3: Problematik bei der taktzeitoptimalen Programmierung von Remote-Laseranlagen. Aufgrund der manipulatorischen und prozessspezifischen Freiheitsgrade sind unendlich viele Bewegungsbahnen der Schweißoptik realisierbar. Für jede Bahn benötigt der Roboter eine bestimmte Zeit zum Durchfahren.

1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise

Um das volle Potential der Remote-Technologie auszuschöpfen, sind effiziente Methoden zur taktzeitoptimalen Programmierung von Remote-Anlagen notwendig. Diese Arbeit setzt sich zum Ziel, Algorithmen zu entwickeln und zu testen, die innerhalb der manipulatorischen und prozessspezifischen Freiheitsgrade Roboterbewegungsbahnen ermitteln, die möglichst kleine Zeitanteile für die Versatzbewegung des Schweißroboters zwischen den Nahtelementen beanspruchen. Dabei werden Berechnungsmethoden für roboterbasierte Schweißanlagen, die über Optikwerkzeuge mit festen und variablen Brennweiten verfügen, betrachtet.

Die Vorgehensweise, um die Zielsetzung der Arbeit zu erreichen, gliedert sich in drei Hauptabschnitte. Die Abbildung 4 zeigt den Aufbau der Arbeit.

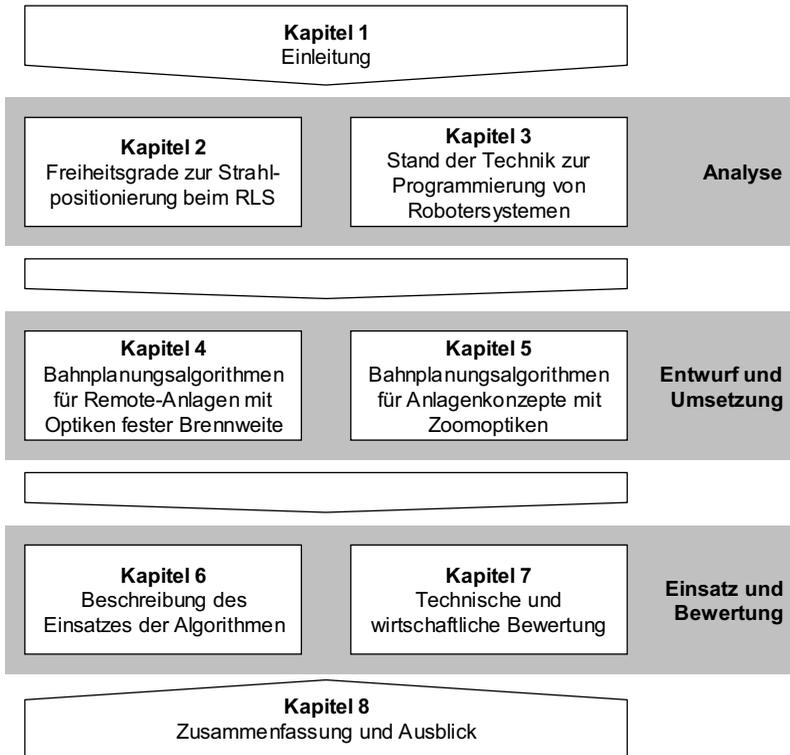


Abbildung 4: Aufbau der Arbeit

Der erste Hauptabschnitt bildet die Analysephase dieser Arbeit. Dabei erfolgt im **Kapitel 2** zunächst die Identifikation der Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung beim RLS, die zur Bewegungsoptimierung herangezogen werden können. Es werden dabei sowohl existierende Anlagenklassen als auch der Schweißprozess selbst beleuchtet. Darauf aufbauend werden im **Kapitel 3** die heute bekannten Methoden zur taktzeitoptimalen Programmierung von Robotersystemen untersucht. Das Kapitel beinhaltet neben den wichtigsten Grundlagen zur Robotik eine Analyse heute vorhandener Bahnplanungsansätze. Anhand der Ergebnisse dieses Abschnittes wird die Ableitung des Handlungsbedarfs für diese Arbeit vorgenommen.

Der zweite Hauptabschnitt beinhaltet den Entwurf und die Implementierung von Optimierungsalgorithmen. Das **Kapitel 4** behandelt Anlagenklassen, die über eine feste Optikkbrennweite verfügen. Der Ansatz zur Taktzeitreduktion ist dabei die Glättung der Schwerpunktbahn der Schweißoptik. Das **Kapitel 5** analysiert, inwieweit die entwickelten Berechnungsmethoden auf Anlagen mit variabler Optikkbrennweite übertragbar sind. Es werden modifizierte Algorithmen vorgestellt, die zum Ziel haben, eine Taktzeitoptimierung dieser Anlagenklasse durch die Glättung der Handwurzelgelenkbewegung des Roboters zu erreichen.

Der dritte Abschnitt beschreibt mögliche Einsatzmethoden der Algorithmen und ermittelt die Leistungsfähigkeit der entwickelten Systeme. Dabei wird im **Kapitel 6** eine aufgabenorientierte Programmierumgebung vorgestellt, die den Einsatz der Berechnungsalgorithmen sowohl für die Anlagenplanung als auch für die operative Anlagenprogrammierung ermöglicht. Anhand zweier Beispiele werden Vergleiche zu den heute bekannten konventionellen Programmiermethoden gezogen. Diese Daten bilden die Grundlage für eine technische und wirtschaftliche Bewertung der Lösungsansätze in **Kapitel 7**.

Den Abschluss der Arbeit bilden die Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse und der Ausblick in **Kapitel 8**.

2 Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung beim RLS

2.1 Kapitelübersicht

Das Ziel dieses Kapitels ist die Identifikation der Freiheitsgrade, die beim Remote-Laserstrahlschweißen zur Optimierung der Roboterbewegung herangezogen werden können. In diesem Zusammenhang ist es zunächst notwendig, den Begriff der Redundanz im Abschnitt 2.2 zu definieren. Der Abschnitt 2.3 beleuchtet anschließend die anlagentechnischen Komponenten von Schweißsystemen zum RLS. Dabei werden die kinematischen Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung sowie die Besonderheiten der Anlagentechnik analysiert. Der Abschnitt 2.4 befasst sich mit der Toleranz des Fügeprozesses gegenüber translatorischen und rotatorischen Positionierungsabweichungen. Der Abschnitt 2.5 fasst die wichtigsten Ergebnisse dieses Kapitels zusammen.

2.2 Definition des Redundanzbegriffs

Der Begriff „Redundanz“ kennzeichnet im Kontext von Robotersystemen das Vorhandensein von mehr manipulatorischen Freiheitsgraden als zur Erfüllung einer Aufgabe notwendig sind (SCHREIBER 2004, S. 11, PFALZGRAF 1997). Ist der Grad der Redundanz r größer als Null, so existieren unendlich viele Gelenkwinkelposen für eine vorgegebene Position des Endeffektors. Ein Beispiel aus der Natur ist der menschliche Arm, der über sieben Freiheitsgrade verfügt. Damit ist es möglich, bei festgelegtem Schulter- und Handpunkt durch Drehung des Ellbogengelenks unendlich viele Armposen einzustellen.

Der Grad der Redundanz r wird in Abhängigkeit der Freiheitsgrade n eines Manipulators und der Dimension des Ergebnisraums m nach folgender Formel (CONKUR & BUCKINGHAM 1997) berechnet:

$$r = n - m. \quad (1)$$

Redundanzen werden nach CONKUR & BUCKINGHAM (1997) eingeteilt in folgende Kategorien:

- Existiert für eine Roboterendlage eine endliche Anzahl von Gelenkwinkelkonfigurationen, so besitzt der Manipulator **Mehrfachlösungen** (engl.: *multiple solutions*). Er ist in diesem Fall nicht kinematisch redundant. Ein typisches Beispiel hierfür ist ein Sechs-Achs-Roboter, der über $n = 6$ Frei-

heitsgrade zum Anfahren einer Position mit $m = 6$ Dimensionen (Lage und Orientierung) verfügt. Nach Gleichung (1) ergibt sich der Grad der Redundanz somit zu $r = 0$. Ein Sonderfall liegt vor, wenn sich die Roboterkinematik in einer degenerierten Stellung, einer so genannten Singularität befindet. In diesem Fall reduziert sich die Dimension von m_s (mit $m_s < m$) und es erhöht sich der Grad der Redundanz zu $r = n - m_s > 0$. Bei Standardmaschinen wie einem Sechs-Achs-Knickarm-Roboter tritt dieser Fall beispielsweise dann auf, wenn die Drehachse des vierten und die des sechsten Gelenks parallel sind.

- Ist die Anzahl der kinematischen Freiheitsgrade n größer als die Dimension des Endeffektorraums m , so ist der Manipulator **kinematisch redundant** (engl.: *kinematically redundant*). In diesem Fall kann der Roboter eine Eigenbewegung durchführen, ohne dabei die Lage des Endeffektors zu verändern (SCHREIBER 2004, S. 11). Ein Beispiel für solche Manipulatoren ist der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte Leichtbauroboter, der über sieben Freiheitsgrade verfügt (GOMBERT et al. 1995, HIRZINGER et al. 2001).
- Ist die Dimension der Aufgabenstellung m_a kleiner als die Dimension des Endeffektorraums m , so ist der Roboter **aufgabenspezifisch redundant** (engl.: *task redundant*). Der Grad der Redundanz berechnet sich dann zu $r = n - m_a > 0$.

Wie diese Definition verdeutlicht, resultiert Redundanz sowohl aus dem kinematischen Aufbau einer Anlage als auch aus der zu erfüllenden Aufgabe. Ist ein Robotersystem redundant, existieren unendlich viele mögliche Gelenkwinkelstellungen. Im Folgenden wird das RLS daraufhin analysiert, welche manipulatorischen Freiheitsgrade n zur Strahlpositionierung existieren und welche Dimension der Ergebnisraum m beim Schweißen mit Laserstrahlung aufweist.

2.3 Manipulatorische Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung

2.3.1 Komponentenüberblick

Das Laserstrahlschweißen erfordert Anlagenkomponenten zur Bereitstellung der fokussierten Laserstrahlung sowie Einrichtungen zur Positionierung des Brennflecks auf dem Bauteil. Weiterhin können Hilfssysteme, beispielsweise Vorrich-

tungen für Mess- und Regelaufgaben des Prozesses, Bestandteil der Anlage sein. Eine Übersicht zu den notwendigen Anlagenkomponenten gibt die Abbildung 5.

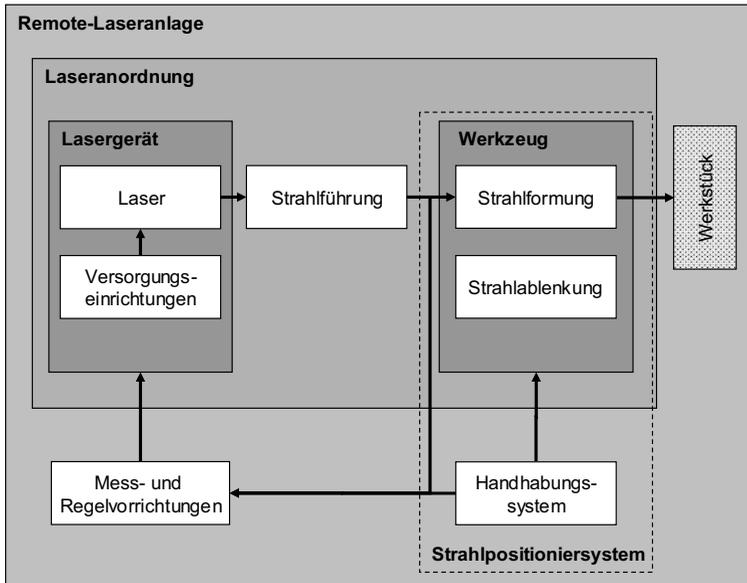


Abbildung 5: Komponenten von Remote-Laseranlagen. Hervorzuheben ist dabei die Integration der Funktionen „Strahlformung“ und „Strahlableitung“ in der Komponente „Werkzeug“. Zusammen mit der Handhabungseinrichtung bilden sie das „Strahlpositioniersystem“ (in Anlehnung an DIN EN ISO 11145 (2006)).

Die Gesamtheit aller Komponenten wird nach DIN EN ISO 11145 (2006) als *Laseranlage* bezeichnet. Remote-Laseranlagen bestehen prinzipiell aus den gleichen generischen Grundkomponenten, wie sie in der genannten Norm enthalten sind. Sie bezeichnet die notwendigen Komponenten zur Strahlerzeugung als *Lasergerät*. Dieses beinhaltet den eigentlichen Laser sowie dessen Versorgungseinrichtungen. Als *Laseranordnung* wird ein Lasergerät in Verbindung mit speziellen, in der Regel optischen, mechanischen und/oder elektrischen Systemkomponenten für die Strahlführung und die Strahlformung verstanden. Der Begriff *Strahlführung* beschreibt Systeme, die für den Transport der Strahlung zur Bearbeitungsoptik notwendig sind. Je nach verwendeter Strahlquelle kann dies mittels Glasfa-

serkabel (bei Festkörperlasern) oder durch Spiegelsysteme (bei Gaslasern) erreicht werden. Teilweise kann die Strahlquelle auch direktstrahlend in Verbindung mit einer Strahlformungseinheit ohne Transportsystem verwendet werden (bei Diodenlasern).

Zur Generierung von Schweißnähten muss eine Relativbewegung zwischen dem Brennfleck und dem Bauteil realisiert werden. Erzeugt wird diese entweder durch die Bewegung des Brennflecks, des Werkstücks oder durch eine Kombination aus beiden durch Handhabungssysteme (ULLRICH 1987).

Bei konventionellen Anlagen herrschte bislang meist eine klare Funktionstrennung vor, bei der ein Handhabungssystem die Positionierung des Strahls und die Bearbeitungsoptik die Formung der Strahlung übernimmt. Eine Besonderheit bei Remote-Laseranlagen ist neben den größeren Arbeitsabständen die Möglichkeit der Integration von Strahlformungsfunktionalitäten und Mechanismen zur Strahlableitung in der Bearbeitungsoptik. Dieser Umstand ist wesentlich und erfordert die Einführung des Begriffes *Strahlpositioniersystem* (siehe Abbildung 5):

Als Strahlpositioniersystem wird die Gesamtheit aller Komponenten einer Laseranlage bezeichnet, welche die Lage und Orientierung der Laserstrahlung beeinflussen können. Es besteht aus einem Handhabungssystem und einem Werkzeug. Das Werkzeug verfügt zwingend über Funktionalitäten zur Strahlformung und kann zusätzliche Strahlableitungsmechanismen besitzen.

2.3.2 Strahlpositioniersysteme roboterbasierter Remote-Anlagen

Beim konventionellen, roboterbasierten Laserstrahlschweißen positioniert ein Industrieroboter eine Bearbeitungsoptik mit fester Brennweite (im Weiteren auch als Festoptik bezeichnet) und dadurch den Brennfleck an der gewünschten Schweißnaht. Da derartige Fokussierwerkzeuge nur über eine sehr kurze Brennweite zwischen 100 mm und 250 mm (THOMY et al. 2004) verfügen, erfolgt die Positionierung des Laserstrahls am Bauteil durch das direkte Verfahren der Optik relativ zur Fügestelle. Diese Systeme verfügen i. d. R. über sechs Freiheitsgrade zur Positionierung des Strahls und sind somit nicht kinematisch redundant. Im Gegensatz dazu stehen Strahlpositioniersysteme für die Remote-Bearbeitung. Deren lange Brennweiten ermöglichen es, zusätzliche Funktionalitäten zur Strahlableitung in die Bearbeitungsoptiken zu integrieren. Bearbeitungsoptiken für das Remote-Laserstrahlschweißen sind derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (siehe beispielsweise STEMMANN &

EMMELMANN 2005, KLING 2004, LINGER 2004). Einen Überblick zu den Anforderungen an Optikwerkzeuge für die Remote-Bearbeitung gibt WEDEL (2007). Es können drei robotergestützte Strahlpositionierprinzipien für die Remote-Bearbeitung unterscheiden werden:

- Die einfachste Form ist ein Robotersystem, welches analog zum konventionellen Laserstrahlschweißen eine Schweißoptik mit fester Brennweite bewegt. Die Optik besteht aus einer festen Anordnung von Kollimations- und Fokussierlinsen. Der Laserstrahl wird, aus der Strahlquelle kommend, zunächst mit einer Kollimationslinse zu einem breiten Strahl geformt und dann auf die Fokussierlinse projiziert. Diese bildet den Brennfleck im Abstand der Brennweite aus (vgl. Abschnitt 2.4.2.2). Der Unterschied zum konventionellen Laserstrahlschweißen liegt in der Brennweite der eingesetzten Fokussierlinse, die deutlich größer gewählt ist. Die Brennweite bei derartigen Systemen ist fest vorgegeben und kann nicht verändert werden. Somit sind diese Systeme ebenso wie konventionelle Schweißanlagen nicht kinematisch redundant. Die Positionierung des Laserstrahls wird bei diesem Konzept analog zur konventionellen Strahlführung durch die Bewegung der gesamten Bearbeitungsoptik durch den Roboter vorgenommen (siehe Abbildung 6, Nr. 2). Allerdings kann die lange Brennweite dazu verwendet werden, die Strahlpositionierung hauptsächlich durch die Roboterhandachsen durchzuführen, wodurch größere Einstrahlwinkel erzeugt werden. Bei konventionellen Systemen mit kurzer Brennweite scheidet diese Möglichkeit aufgrund der Problematik der Zugänglichkeit am Bauteil meist aus.
- Die zweite Bauform wird von RIPPL (2006) als Zoomoptik bezeichnet. Der Aufbau einer Zoomoptik entspricht der von Bearbeitungsoptiken mit langer Festbrennweite, mit dem Unterschied, dass die Kollimationslinse und die Fokussierlinse zueinander verschieblich angeordnet sind. Dadurch ist es möglich, die Brennweite der Bearbeitungsoptik variabel einzustellen. Der Hauptvorteil bei diesem System ist die Anpassungsfähigkeit der Brennweite an Höhenunterschiede des Bauteils, ohne dass der Roboter dazu eine zusätzliche Bewegung der Optik durchführen muss. Durch die einstellbare Brennweite verfügen diese Systeme über sieben manipulatorische Freiheitsgrade und sind somit kinematisch redundant. Theoretisch ist es möglich, alle Schweißnähte innerhalb des erreichbaren Feldes aus den Roboterhandachsen durch starke Strahlanstellung zu fügen (siehe Abbildung 6, Nr. 3). In der Praxis ist dies allerdings aufgrund von Abschattungen durch Bauteilspanner oder das Werkstück selbst häufig nicht möglich. Die Strahlpositionierung muss daher in den

meisten Fällen durch alle Roboterachsen durchgeführt werden. Aufgrund der kinematischen Redundanz dieses Systems kann allerdings die Entkopplung von Haupt- und Handachsen zur Grob- bzw. Feinpositionierung des Strahls genutzt werden.

- Das dritte Strahlpositionierkonzept wird meist als Scannerschweißen bezeichnet (HAMMER & BROCKMANN 2006, THOMY et al. 2004, HORNIG 2002). Dieses Konzept unterscheidet sich stark von den beiden anderen Bauformen. Scanneroptiken verfügen neben der Fokussiereinrichtung zusätzlich über Spiegelsysteme mit Galvanometerantrieben, die den Strahl in zwei Raumrichtungen ablenken können (siehe Abbildung 6, Nr. 4). In Kombination mit Industrierobotern verfügen diese Systeme über 8 manipulatorische Freiheitsgrade und sind somit ebenfalls kinematisch redundant.

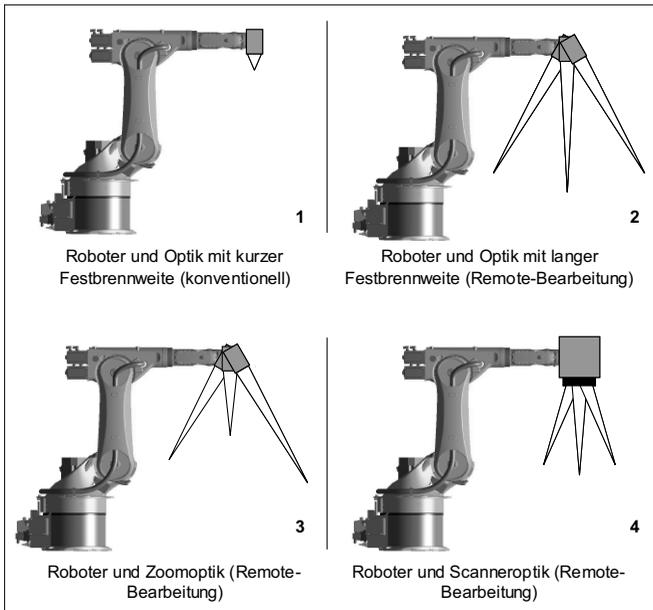


Abbildung 6: Darstellung der wichtigsten roboterbasierten Strahlpositionierkonzepte für die Remote-Bearbeitung (2, 3 und 4) im Vergleich zur konventionellen Strahlführung (1). Während (2) lediglich eine größere Brennweite aufweist, verfügen die Konzepte (3) und (4) über zusätzliche Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung.

2.4 Dimension des Ergebnisraums beim Laserstrahlschweißen

2.4.1 Prozessparameter und Kenngrößen des Schweißprozesses

Das Ergebnis einer Verschweißung hängt beim Fügen mittels Laserstrahlung von einer Vielzahl von Größen ab. Eine Einteilung der Parameter ist nach BESKE (1992) in folgende vier Hauptgruppen sinnvoll:

- **Laserparameter:** Typische Laserparameter sind die Wellenlänge, die maximale Leistung und die Qualität der Laserstrahlung. Diese sind durch die Auswahl eines bestimmten Lasertyps bereits festgelegt und können nicht verändert werden. Der wichtigste einstellbare Parameter beim Laserstrahlschweißen innerhalb dieser Gruppe ist die tatsächlich abgegebene Laserleistung.
- **Werkstückparameter:** Die Werkstückparameter werden durch die konstruktiven Anforderungen an ein Bauteil bestimmt. Typische Parameter sind die Anzahl, die geometrische Ausprägung und die Lage von Schweißnähten. Hinzu kommen fertigungstechnische Aspekte wie die ausgewählte Spanntechnik und die damit in Verbindung stehenden Spaltmaße. Innerhalb dieser Gruppe sind alle Kenngrößen während des Schweißvorgangs unveränderbar.
- **Werkstoffparameter:** Die Auswahl eines Werkstoffes für ein Bauteil wird durch die Anforderungen der Konstruktion bestimmt. Die Materialkennwerte, wie beispielsweise die optischen Konstanten (bspw. Brechungsindex, Absorptionsindex), die geometrische und chemische Beschaffenheit der Oberfläche (bspw. Oxidschichten), beeinflussen maßgeblich das Absorptionsverhalten bezüglich der Strahlung und damit die Energieeinkopplung ins Werkstück (POPRAWA 2005, S. 13 f.). Die Werkstoffparameter sind während des Fügeprozesses nicht veränderbar.
- **Anlagenparameter:** Zu den Anlagenparametern zählen die Eigenschaften der Strahlführung, des Optikwerkzeuges sowie der Handhabungseinrichtung. Die Auswahl der verwendeten Maschinentypen beeinflusst maßgeblich die erreichbaren Positioniergenauigkeiten und die Bahntreue. Die meisten Maschinenparameter sind unveränderliche Größen. Eine Ausnahme bildet die Schweißgeschwindigkeit.

Wie aus dieser Betrachtung deutlich wird, sind die meisten Randbedingungen für das Laserstrahlschweißen durch die konstruktiven Anforderungen und die Charakteristik des verwendeten Anlagentyps fest vorgegeben. Die Aufgabe der Programmierung einer Laserstrahlschweißaufgabe besteht darin, einen geeigneten Parametersatz zu ermitteln, der unter den gegebenen Randbedingungen ein optimales Schweißergebnis liefert. Die beiden wichtigsten einstellbaren Prozessparameter sind die Laserleistung und die Vorschubgeschwindigkeit. Diese liefern für die gegebenen Randbedingungen die gewünschte Schweißqualität (siehe Abbildung 7).

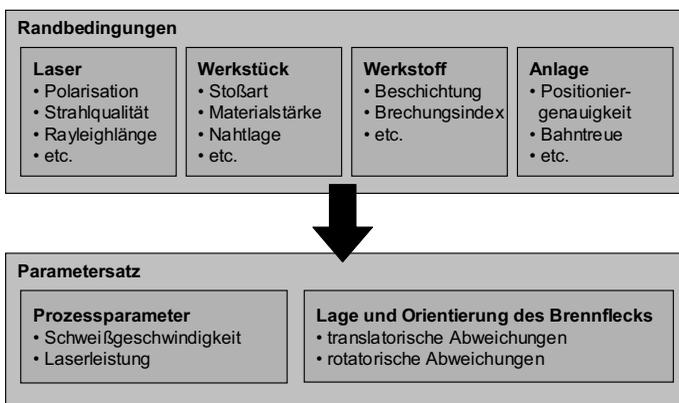


Abbildung 7: Randbedingungen und Parameter beim Laserstrahlschweißen

Allerdings unterliegt die Stabilität des Prozesses nicht nur den konstruktiven und anlagenspezifischen Randbedingungen. Sie hängt auch maßgeblich von der Genauigkeit der eingestellten Lage und Orientierung des Brennflecks bezüglich des Bauteils ab, die durch die Handhabungseinrichtung realisiert werden. Nachfolgend werden die möglichen Abweichungen bei der Strahlpositionierung gegenüber einer Solllage genauer untersucht.

2.4.2 Abweichungen der Lage und Orientierung des Brennflecks

2.4.2.1 Vorbemerkungen

Beim Laserstrahlschweißen muss die Handhabungseinrichtung den Brennfleck an die Schweißposition bewegen. Beschrieben wird sowohl die Lage und Orientie-

nung des Brennflecks als auch die der Schweißposition durch Koordinatensysteme (im Weiteren auch als Frames bezeichnet). Bei der Überlagerung der beiden Frames können jeweils drei translatorische und drei rotatorische Abweichungen gegenüber einer Solllage auftreten (siehe Abbildung 8).

	Translation	Rotation
X		
Y		
Z		

Abbildung 8: Mögliche Abweichungen bei der Positionierung eines Laserstrahls (Index L) bezüglich einer Sollposition (Index S)

Abweichungen können unbeabsichtigt auftreten, beispielsweise durch Positionierungsfehler der Handhabungseinrichtung oder durch thermisch induzierten Fokusschift³. Sie können allerdings auch ganz bewusst durch eine Veränderung der Lage und Orientierung der Schweißoptik realisiert werden. Nachfolgend werden die prozesstechnischen Grenzen der absichtlich herbeigeführten Lage- und Orientierungsabweichungen näher beleuchtet.

Vorher ist es jedoch notwendig, zwei Konventionen zu vereinbaren:

- Die Lage und Orientierung eines Laserstrahls im Raum wird durch ein Frame beschrieben, welches sich im Fokus der Strahlung befindet. Die Lage des Frames kann beliebig gewählt sein. Innerhalb dieser Arbeit gilt, dass die Z-Achse parallel zum Strahl liegt und entgegen der Strahlrichtung zeigt. Die beiden anderen Achsen müssen jeweils zueinander und zur Z-Achse orthogonal gewählt sein. Für die Handhabungseinrichtung ist der Ursprung dieses Frames der Wirkort des Werkzeuges. Es wird daher auch als Tool-Center-Point-Frame (TCPF) bezeichnet.
- Die Lage und Orientierung einer Schweißposition wird durch ein Positionsframe beschrieben. Positionsframes werden in dieser Arbeit so definiert, dass die positive Z-Achse parallel zur Flächennormalen des gewählten Punktes zeigt. Die positive X-Achse zeigt in Richtung des nächsten Nahtpunktes. Die Y-Achse ergibt sich durch die Bildung des Kreuzproduktes, sodass sich ein Rechtshandsystem ausbildet.

2.4.2.2 Translatorische Abweichungen

Die translatorischen Freiheitsgrade bestehen aus den Verschiebungen des TCPF bezüglich der X-, Y- und Z-Achse des Positionsframes. Ein Versatz entlang der X- und Y-Achse bedeutet beim Laserstrahlschweißen, dass die angestrebte Schweißposition nicht getroffen wird. Zwar werden beim Remote-Laserstrahlschweißen häufig Überlappverbindungen hergestellt, bei denen ein gewisser Spielraum bezüglich der Nahtlage innerhalb der Flanscbreite besteht.

³ Durch die Absorption von Laserstrahlung im Linsensystem einer Bearbeitungsoptik kann sich der Brechungsindex des Linsenmaterials ändern. Die Folge ist die Ausbildung einer thermischen Linse sowie eine Deformation. Dadurch kann eine Lageänderung der Fokusposition entstehen (siehe WEDEL & NIEDRIG 2006).

Trotzdem ist die Verwendung dieser beiden Freiheitsgrade zur Ermittlung von schnellen Roboterbewegungen nicht geeignet.

Anders stellt sich die Situation bei dem Versatz entlang der Z-Achse dar, die parallel zur Strahlrichtung ist. Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge ist es notwendig, die Eigenschaften von Laserstrahlung näher zu betrachten.

Die mit einem Laser erzeugte Strahlung ist durch verschiedene Eigenschaften, wie die mittlere Leistung, den Strahldurchmesser, die Strahldivergenz, die Farbe, die Wellenlänge sowie die Polarisation charakterisiert. Für bestimmte Anwendungen, z. B. in der Materialbearbeitung und der Messtechnik, wird zusätzlich häufig von der Qualität einer Strahlquelle gesprochen (EICHLER et al. 2004).

Der Begriff *Strahlqualität* beschreibt die Eigenschaft des Lasers, die für seine Fokussierbarkeit verantwortlich ist. Unter Fokussierbarkeit wird in diesen Zusammenhang das Erreichen eines bestimmten Fokusbereichs bei gegebener Brennweite verstanden (KRASTEL 2002). Als Grundlage zur Beschreibung dieser Eigenschaft dient das Strahlparameterprodukt (*SPP*)

$$SPP = \frac{d_0 \cdot \theta_0}{4}. \quad (2)$$

Das *SPP* berücksichtigt den Durchmesser d_0 und den Divergenzwinkel θ_0 des Rohstrahls (siehe Abbildung 9) und erlaubt somit den Vergleich von Lasern unterschiedlicher Wellenlängen.

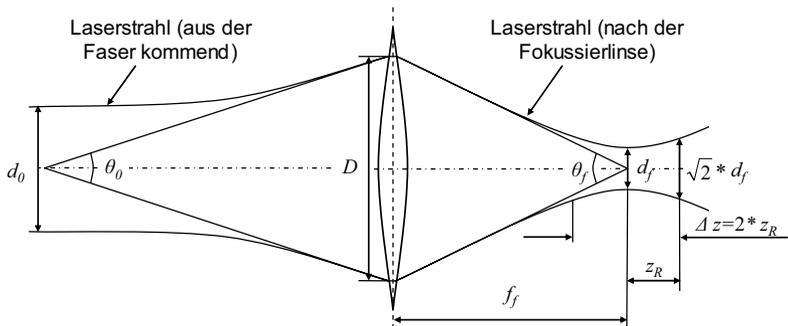


Abbildung 9: Wichtige Größen bei der Fokussierung von Laserstrahlung nach HERING & MARTIN (2006)

Strahlquellen im niedrigen Leistungsbereich erzeugen meist einen Strahl, der beim Durchgang durch eine ideale Linse im Brennpunkt eine Gauß'sche Intensitätsverteilung aufweist. Die transversale Schwingung eines solchen Strahls wird als TEM_{00} -Mode (transversal elektro-magnetisch) oder auch als Grundmode bezeichnet (EICHLER et al. 2004). Für die Grundmode wird das Strahlparameterprodukt aus dem Verhältnis der Wellenlänge λ des Strahls und der Kreiszahl π wie folgt berechnet:

$$SPP_{00} = \frac{\lambda}{\pi}. \quad (3)$$

Die Ausbildung eines Gaußstrahls (TEM_{00}) gilt als Idealfall. In der Realität, vor allem bei Festkörperlasern mit hohen Leistungen, zeigt die erzeugte Strahlung allerdings Abweichungen dazu auf. Ursache dafür sind nach EICHLER et al. (2004) das Anschwingen höherer transversaler Moden, das Auftreten von Amplituden- oder Phasenstörungen aufgrund einer inhomogenen Verstärkung des Lasermediums oder die Ausbildung von Teilstrahlen. Reale Laserstrahlen weisen dadurch eine höhere Divergenz und bei der Fokussierung einen größeren Strahldurchmesser auf als der Gaußstrahl. In der Praxis wird deshalb die Qualität eines Laserstrahles durch den dimensionslosen Strahlpropagationsfaktor K

$$K = \frac{\lambda}{\pi} * \frac{4}{d_0 * \theta_0} \quad (4)$$

gekennzeichnet, der sich aus dem Verhältnis des Strahlparameterprodukts des Gaußstrahls (SPP_{00}) zu dem des realen Strahls (SPP_{real}) bildet. Der Strahlpropagationsfaktor K kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 eine Strahlquelle mit optimaler Strahlqualität charakterisiert.

Im englischsprachigen Raum wird anstelle von K die Beugungsmaßzahl M^2 verwendet, die sich aus dem Kehrwert von K bildet:

$$M^2 = \frac{1}{K}. \quad (5)$$

Der Strahlpropagationsfaktor und die Beugungsmaßzahl sind nach DIN EN ISO 11145 (2006) ein Maß für die Qualität eines Laserstrahls und geben an, wie nahe das Strahlparameterprodukt an der Beugungsbegrenzung eines vollkommenen Gaußstrahls ist (HERING & MARTIN 2006, S. 283-316). Bei einem idealen Gaußstrahl ist $M^2 = 1$, wohingegen reale Strahlen Werte von $M^2 > 1$ aufweisen.

Es ergibt sich somit der Wert des SPP für reale Strahlquellen durch die Gleichung

$$SPP = \frac{\lambda}{\pi} * M^2. \quad (6)$$

Der Wert des SPP bleibt nach HÜGEL (1992) beim Durchgang des Laserstrahls durch ideale Fokussierlinsen erhalten. Es gilt somit

$$SPP = \frac{d_0 * \theta_0}{4} = \frac{d_f * \theta_f}{4}, \quad (7)$$

wobei d_f den Durchmesser im Brennpunkt und θ_f den Divergenzwinkel des fokussierten Strahls repräsentieren (siehe Abbildung 9).

Der mit einer Strahlquelle für eine gegebene Fokussierlinse erreichbare kleinste Fokusedurchmesser ergibt sich somit aus (7) zu

$$d_f = 4 * SPP * \frac{1}{\theta_f} = 4 * SPP * \arctan\left(\frac{f_f}{D}\right), \quad (8)$$

wobei D den Durchmesser des Laserstrahls auf der Fokussierlinse kennzeichnet. Für Brennweiten $f_f \gg D$ kann in guter Näherung der Ausdruck in Gleichung (8) als

$$d_f = 4 * \frac{\lambda}{\pi} * M^2 * \frac{f_f}{D} = 4 * \frac{\lambda}{\pi} * M^2 * F \quad (9)$$

dargestellt werden. Die Fokussierzahl F bildet sich dabei aus dem Quotienten von f_f und D .

Den kleinsten Strahldurchmesser erhält man im Brennpunkt einer Fokuslinse. Eine weitere für das Laserstrahlschweißen wichtige Kenngröße ist, neben dem bereits erläuterten Strahlparameterprodukt, dem Strahlpropagationsfaktor und der Beugungsmaßzahl, die Tiefenschärfe Δz des fokussierten Laserstrahls.

Die Tiefenschärfe beschreibt die Ausdehnung des Bereichs vor und nach dem Fokus, innerhalb dessen sich die Fläche gegenüber dem kleinstmöglichen Brennfleck verdoppelt. Dies bedeutet ein Anwachsen des Fokusedurchmessers um den Faktor $\sqrt{2}$. Die Tiefenschärfe ergibt sich aus der doppelten Rayleighlänge z_R (siehe Abbildung 9), für die der formelmäßige Zusammenhang

$$z_R = 4 * \frac{\lambda}{\pi} * M^2 * \left(\frac{f_f}{D} \right)^2 \quad (10)$$

gilt. Eine große Rayleighlänge und damit eine große Tiefenschärfe ist für das Laserstrahlschweißen von besonderer Bedeutung. Innerhalb dieses Bereichs sind Schwankungen der Fokusslage in Strahlrichtung tolerierbar, da sie sich nicht negativ auf den Schweißprozess auswirken (RUB 2004, S. 22, HÜGEL 1992). Man geht dabei davon aus, dass eine Halbierung der Leistungsdichte auf dem Bauteil noch verkraftet werden kann, ohne dass der Prozess beeinträchtigt wird.

Aus den Gleichungen (9) und (10) ergeben sich folgende Zusammenhänge:

- Wird bei gegebener Strahlqualität des Lasers und bei konstantem Strahldurchmesser D auf der Fokussierlinse die Brennweite vergrößert, so wächst der erreichbare kleinste Fokussdurchmesser linear und die Rayleighlänge steigt quadratisch mit der Brennweite an.
- Wird bei konstanten optischen Gegebenheiten (Brennweite f_f und Strahldurchmesser D auf der Fokuslinse) die Strahlqualität des Lasers erhöht, so ergeben sich kleinere Fokussdurchmesser. Die Rayleighlänge verkürzt sich durch die Verkleinerung des Brennflecks.
- Wird keine Vergrößerung der Brennweite gewünscht, kann eine bessere Strahlqualität auch zur Verkleinerung von D verwendet werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass Fokussieroptiken kleiner dimensioniert werden können.
- Beim Laserstrahlschweißen wird ein definierter Fokussdurchmesser benötigt. Im Umkehrschluss folgt aus den Gleichungen (3) und (4), dass bei der Erzeugung eines definierten Brennfleckdurchmessers die Brennweite erhöht werden kann, wenn die Strahlqualität des Lasers zunimmt. Die Rayleighlänge ist dabei größer als bei einer kurzen Fokussierung.

Aus diesen Zusammenhängen wird deutlich, dass Remote-Laseranlagen über Strahlquellen mit hoher Strahlqualität verfügen müssen, um für einen angestrebten Arbeitsabstand noch einen ausreichend kleinen Fokussdurchmesser zu gewährleisten. Interessant ist dabei die im Vergleich zu konventionellen Laseranlagen deutlich größere Rayleighlänge, innerhalb derer ein TCPF-Versatz in Z-Richtung möglich ist.

In Abhängigkeit der eingesetzten Strahlquelle und Fokussiereinrichtung sind unterschiedliche Bereiche des Fokusalagenversatzes tolerierbar. GRUPP et al. (2003) ermitteln beispielsweise für einen CO₂-Laser und eine Scanneroptik einen tolerierbaren Fokusalagenversatz von ± 6 mm. Für einen Faserlaser mit einer konventionellen Optik zeigen ZAEH et al. (2007) in einer experimentellen Analyse einen tolerierbaren Fokusalagenversatz von ± 20 mm.

2.4.2.3 Rotatorische Abweichungen

Die rotatorischen Freiheitsgrade bestehen aus den Verdrehungen des TCPF um die X-, Y- und Z-Achse des Positionsframes.

Eine Verdrehung des TCPF um die X- und Y-Achse bedeutet die Veränderung des Winkels, unter dem der Laserstrahl auf das Bauteil trifft. Man unterscheidet bei den Einstrahlwinkeln in Abhängigkeit der Vorschubbewegung eine Anstellung in stehender, schleppender und lateraler Richtung gegenüber der Flächennormalen an der Schweißstelle (siehe Abbildung 10).

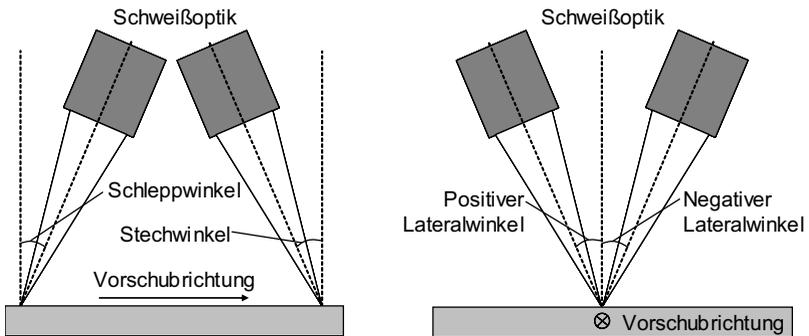


Abbildung 10: Unterteilung der Einstrahlwinkel in Abhängigkeit der Vorschubrichtung in Stechwinkel, Schleppwinkel sowie positive und negative Lateralwinkel

Als Qualitätskriterium einer Schweißnaht werden häufig die erreichte Einschweißtiefe und die Gestalt des Nahtquerschnittes herangezogen. Durch eine schräge Einstrahlung ändert sich auch der Winkel, unter dem der Dampfkanal beim Tiefschweißen in das Material eintritt. Im Kontext von variierenden Einstrahlwinkeln ist daher zwischen der Penetrationstiefe und der effektiven Schweißnahttiefe zu unterscheiden (siehe Abbildung 11).

Durch die Verfügbarkeit von Laserstrahlquellen mit hoher Strahlqualität und die dadurch mögliche Remote-Technologie wurde die schweißtechnische Betrachtung von variierenden Einstrahlwinkeln und deren Einfluss auf die Schweißnahttiefe zum Gegenstand von Forschungsarbeiten. Eine Reihe von Autoren hat sich daher mit dieser Thematik innerhalb von theoretischen (TSOUKANTAS & CHRYSOLOURIS 2006) und experimentellen (GRUPP et al. 2003, OEFELE et al. 2008, ZAEH et al. 2006a) Arbeiten beschäftigt. Die Ergebnisse zeigen, dass Einstrahlwinkel von bis zu 30° und mehr (bezogen auf die Flächennormale, siehe Abbildung 10) durchaus noch zu annehmbaren Schweißnahttiefen führen können. Eine exakte, allgemeingültige Aussage kann jedoch nicht abgeleitet werden. Vielmehr muss bauteilspezifisch der erlaubte Winkelbereich für eine Schweißaufgabe ermittelt werden (ZAEH et al. 2006a).

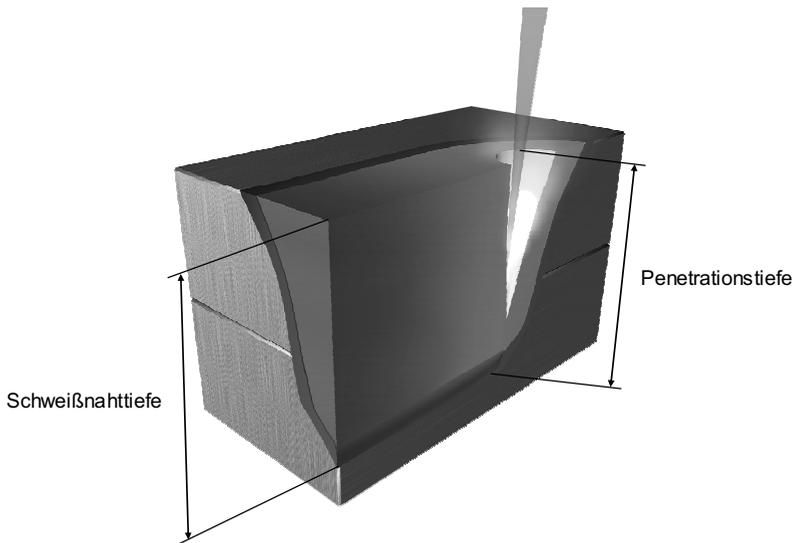


Abbildung 11: Penetrations- und Schweißnahttiefe beim Laserstrahlschweißen
(nach GRUPP et al. 2003)

Der dritte Freiheitsgrad entspricht der Rotation des Laserstrahls um die Strahlachse. Beim roboterbasierten Laserstrahlschweißen wird in der Regel eine Lichtleitfaser zum Strahlungstransport verwendet. Dabei bildet sich das kreisförmige Faserende bei der Fokussierung als rotationssymmetrischer Brennfleck ab. Daher kann die Orientierung des Strahls um die Z-Achse für das Remote-

Laserstrahlschweißen beliebig eingestellt werden, ohne das Prozessergebnis zu beeinflussen.

Aus den Betrachtungen innerhalb dieses Abschnittes wird deutlich, dass die rotatorischen Freiheitsgrade für das Remote-Laserstrahlschweißen aus prozesstechnischer Sicht weite Lösungsräume zur Strahlpositionierung bieten. Zwar ist auch beim konventionellen Laserstrahlschweißen eine Variation des Einstrahlwinkels oder die freie Orientierung um die Strahlachse theoretisch möglich. In der Praxis können diese allerdings aufgrund des kurzen Abstandes zwischen Optik und Bauteil und der damit verbundenen Kollisionsgefahr nur in engen Grenzen genutzt werden.

2.5 Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels wurden die wichtigsten Konzepte von roboterbasierten Strahlpositioniersystemen für das Remote-Laserstrahlschweißen vorgestellt. Es zeigte sich, dass durch die Verfügbarkeit von langen Brennweiten neue Optikkonzepte mit integrierten Mechanismen zur Strahlmanipulation realisiert werden können. Diese Systeme verfügen über $n \geq 6$ manipulatorische Freiheitsgrade.

Eine Betrachtung des Schweißprozesses ergab, dass eine translatorische Abweichung der Fokuslage in Strahlrichtung näherungsweise innerhalb der Tiefenschärfe des fokussierten Strahls möglich ist. Diese ist bei Remote-Laseranlagen aufgrund des zwingenden Einsatzes von Strahlquellen mit hervorragender Strahlqualität deutlich größer, als bei konventionellen Systemen.

Ebenso erlauben es die langen Brennweiten, die drei rotatorischen Freiheitsgrade in erheblich weiteren Grenzen zur Strahlpositionierung zu nutzen. Aus prozesstechnischer Sicht sind Einstrahlwinkel gegenüber der Flächennormalen von bis zu 30° realisierbar. Die Dimension des Ergebnisraums m reduziert sich durch die genannten prozessspezifischen Freiheitsgrade von sechs auf zwei.

Durch Einsetzen der ermittelten Werte von n und m in die Formel (1) lassen sich die Redundanzgrade für die verschiedenen Ausprägungen von Remote-Laserstrahlschweißsystemen ermitteln (siehe Abbildung 12). Es zeigt sich, dass beim RLS im Gegensatz zu konventionellen Schweißanlagen hochgradig redundante Systeme vorliegen.

2 Freiheitsgrade zur Strahlpositionierung beim RLS

Strahlpositioniersystem				
Anlagentyp	Konventionell	Remote		
Handhabungssystem	Sechs-Achs-Knickarm-Roboter	Sechs-Achs-Knickarm-Roboter	Sechs-Achs-Knickarm-Roboter	Sechs-Achs-Knickarm-Roboter
Werkzeug	Optik mit kurzer, fester Brennweite	Optik mit langer, fester Brennweite	Optik mit variabler Brennweite (Zoomoptik)	Schweißscanner
Schweißprozess				
Translatorische Freiheitsgrade	vernachlässigbar kleine Tiefenschärfe	Tiefenschärfe	Tiefenschärfe	Tiefenschärfe
Rotatorische Freiheitsgrade	stark begrenzte Änderungen der Einstrahlwinkel und der Strahlorientierung (wegen Kollisionsgefahr)	Einstrahlwinkel Strahlorientierung	Einstrahlwinkel Strahlorientierung	Einstrahlwinkel Strahlorientierung
Redundanz				
Freiheitsgrade zur Strahlmanipulation n	6	6	7	9
Dimension des Ergebnisraums m	6	2	2	2
Grad der Redundanz r	0	4	5	7

Abbildung 12: Redundanzgrade verschiedener Remote-Anlagenkonzepte

3 Stand der Technik zur Programmierung von Robotersystemen

3.1 Kapitelübersicht

Im vorangegangenen Kapitel wurde das Remote-Laserstrahlschweißen hinsichtlich seiner Bewegungsführungsmöglichkeiten analysiert. Es zeigte sich, dass roboterbasierte Remote-Anlagen in Verbindung mit dem Schweißprozess als hochredundante Systeme zu verstehen sind.

Die Mannigfaltigkeit der Lösungen einer Positionieraufgabe wirft die Frage auf, wie derartige Systeme effizient eingesetzt und programmiert werden können. Dazu ist es zunächst notwendig, sich im Abschnitt 3.2 die wesentlichen Grundlagen zur Industrierobotik und dabei hauptsächlich die Beschreibungs- und Berechnungsmethoden für Manipulatoren innerhalb der verschiedenen Betrachtungsräume vor Augen zu führen.

Der Abschnitt 3.3 behandelt darauf aufbauend die Möglichkeiten zur Programmierung von redundanten Robotersystemen. Dabei werden die heute im industriellen Bereich üblichen konventionellen Methoden der Online- und Offline-Programmierung erläutert. Darüber hinaus werden die heute bekannten Algorithmen zur zeitoptimalen Bewegungsermittlung von Robotersystemen daraufhin untersucht, inwieweit sie für die speziellen Randbedingungen beim RLS einsetzbar sind. Der Abschnitt 3.4 fasst die in diesem Kapitel analysierten Ansätze zusammen und leitet daraus den Handlungsbedarf für diese Arbeit ab.

3.2 Grundlagen der Industrierobotik

3.2.1 Definition und Bauformen von Industrierobotern

Die Norm DIN EN ISO 8373 (1994) definiert den Begriff des *Industrieroboters* als

„automatisch gesteuerten, frei programmierbaren Mehrzweckmanipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann“.

Ein Roboter besteht somit aus einem Manipulator und einer Steuerung. Die Einteilung der industriell eingesetzten Robotersysteme erfolgt üblicherweise nach der Bauart des Manipulators. Unter dem Begriff des Manipulators bezeichnet die Norm DIN EN ISO 8373 (1994) eine

„Maschine, deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht, die durch Gelenke oder gegeneinander verschieblich verbunden sind, mit dem Zweck, Gegenstände (Werkstücke oder Werkzeuge) zu greifen und/oder zu bewegen, normalerweise mit mehreren Freiheitsgraden“.

Ein Manipulator besteht aus mehreren Gliedern, welche durch Gelenke miteinander verbunden sind. Zur Anwendung kommen meist Dreh- oder Schubgelenke mit einem Freiheitsgrad. Nach dem kinematischen Aufbau von Manipulatoren unterscheidet man serielle und parallele Roboter. Parallele Systeme, wie beispielsweise Hexapoden, spielen aufgrund des eingeschränkten Arbeitsraums und der aufwändigen Steuerungstechnik in der Produktionstechnik heute lediglich eine untergeordnete Rolle. Die wichtigsten Robotersysteme im industriellen Umfeld sind seriell aufgebaut. Deren Hauptvertreter sind SCARA- (selective compliance assembly robot arm) sowie Portal- und Gelenkarmroboter (ICHBIAH 2005), die sich in der Art, der Anordnung und der Anzahl ihrer Achsen unterscheiden und somit die Bewegungsfreiheitsgrade im Raum definieren.

Der wichtigste Vertreter der seriellen Manipulatoren ist der Gelenkarmroboter in Sechs-Achs-Knickarm-Bauweise, der heute für einen Großteil der Roboteranwendungen als Standardmaschine eingesetzt wird (JACOB 2004). Durch ihren kinematischen Aufbau sind derartige Systeme in der Lage, mit der Roboterhand jeden Punkt im Halbkugel-förmigen Arbeitsraum in jeder beliebigen Orientierung zu erreichen. Aufgrund dieser Fähigkeit eignen sich Knickarmroboter besonders für die flexible Bearbeitung von dreidimensionalen Bauteilen (WESTKÄMPER & WARNECKE 2006, S. 158).

3.2.2 Steuerungstechnischer Aufbau

Die Steuerung von Industrierobotern dient zur Verarbeitung von Programmen. Der Steuerungskern besteht aus einem Programmspeicher, einem Interpreter, einem Interpolator mit Lageregelung sowie einer Funktionssteuerung (siehe Abbildung 13).

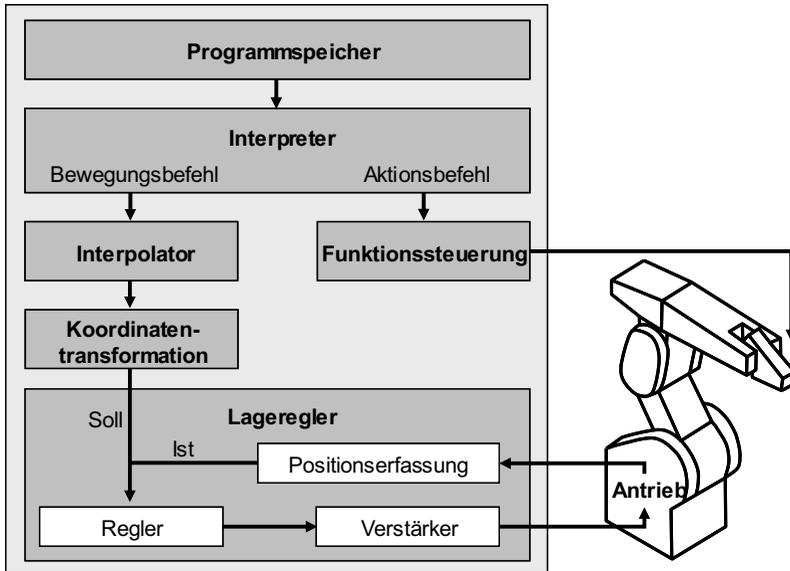


Abbildung 13: Aufbau und Funktionsweise von Industrierobotersteuerungen

Im Speicher werden erstellte Programme vorgehalten. Die einzelnen Befehlssätze eines Programms werden vom Interpreter daraufhin analysiert, ob es sich um einen Bewegungs- oder Schaltbefehl handelt. Schaltbefehle werden an eine Funktionssteuerung übergeben, die diese in zyklischer Abfolge auswertet. Bewegungsbefehle, bestehend aus einem Start- und Endpunkt, werden an einen Interpolator gegeben, der die Zwischenpositionen der Bewegung nach der vorgegebenen Interpolationsvorschrift und der programmierten Bahngeschwindigkeit berechnet. Die interpolierten Werte beschreiben die Soll-Position des Manipulators für den gegebenen Zeitschritt und dienen als Eingangsgrößen für die Lageregelung.

Um vorgegebene Punkte im Raum anfahren zu können, müssen die interpolierten Werte in Achswinkellagen der einzelnen Robotergelenke überführt werden. Dazu sind Transformationen zur Lagebeschreibung des Roboters notwendig.

3.2.3 Lagebeschreibung von Manipulatoren

3.2.3.1 Koordinatensysteme und Beschreibungsräume

Industrieroboter werden für unterschiedliche Fertigungsaufgaben in einer Vielzahl von kinematischen Bauformen angeboten. Die Anzahl, die Art und die Anordnung der steuerbaren Gelenke eines Roboters legen zusammen mit den Abmessungen der Armelemente das kinematische Übertragungsverhalten zwischen den Achslagen und der räumlichen Anordnung seiner Gelenkkette im kartesischen, raumfesten Koordinatensystem fest. Von besonderem Interesse ist dabei die Lage und Orientierung des Tool-Center-Point-Frames. Das TCPF definiert die räumliche Lage des geführten Werkzeugs und wird beim Laserstrahlschweißen in den Fokus der Strahlung gelegt (vgl. Abschnitt 2.4).

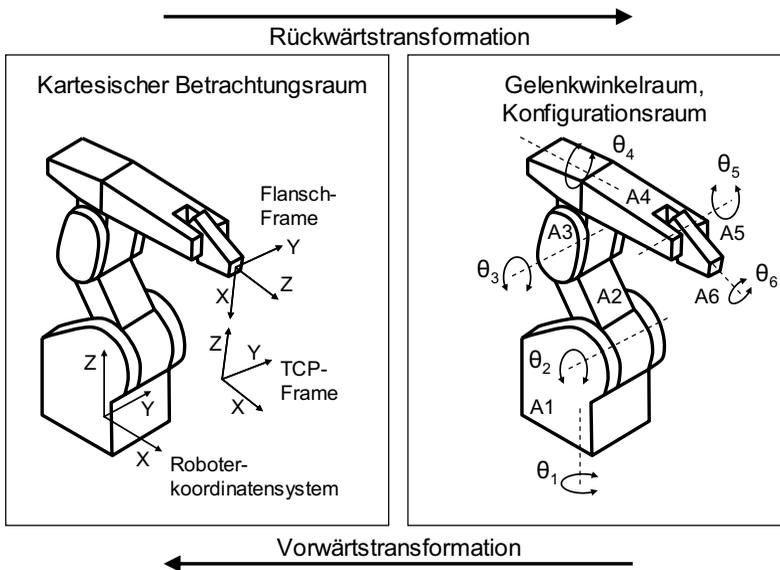


Abbildung 14: Betrachtungsräume und wichtige Koordinatensysteme von Manipulatoren. Bei der gezeigten Sechs-Achs-Knickarm-Roboterkinematik werden die Achsen A1-A3 (rechts) als Hauptachsen bezeichnet. Die Achsen A4-A6 bilden eine Zentralhand, deren Rotationsachsen sich in einem Punkt schneiden (Handwurzelpunkt).

Die mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den gelenkspezifischen Variablen und den kartesischen Koordinaten im raumfesten Koordinatensystem erfolgt durch roboterspezifische Transformationsgleichungen. Soll für eine gegebene Achsstellung die daraus resultierende Raumlage des TCPF ermittelt werden, spricht man von der Lösung des kinematischen Problems bzw. von der Vorwärtstransformation. Die umgekehrte Fragestellung, nämlich die Ermittlung der Roboterachslagen für eine gegebene Raumlage durch Rücktransformation, wird als das inverse kinematische Problem bezeichnet (vgl. PFALZGRAF 1997, MUENCH 1991, S. 17) (siehe Abbildung 14).

3.2.3.2 Vorwärtstransformation

Zur Bestimmung der kartesischen Lage des Endeffektors⁴ eines Manipulators ist die Kenntnis der Lagen der Einzelgelenke notwendig, die wiederum von den eingestellten Gelenkwinkeln der Einzelachsen abhängen. Dazu wird jedes Glied der kinematischen Kette mit einem körperfesten Koordinatensystem verbunden, welches als homogene 4x4-Matrix⁵ der Form

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x & X \\ x_y & y_y & z_y & Y \\ x_z & y_z & z_z & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

dargestellt wird. Die Indizes von T geben an, dass es sich um die Lage und Orientierung des Koordinatensystems im Gelenk i bezogen auf das im Gelenk $i-1$ handelt. Die ersten drei Spalten beschreiben die Rotation, die vierte die Verschiebung des i -ten Frames, bezogen auf das vorherige Gelenk.

Prinzipiell kann die Gelenklage durch beliebige Frames definiert werden. Allerdings wird die Lösung des kinematischen Problems dann entsprechend aufwändig. Zur Vereinfachung der Berechnung existieren zwei Methoden zur Definition der Frames. Die erste ist die von DENAVIT & HARTENBERG (1955) veröffentlichte Denavit-Hartenberg-Konvention (DH). Daneben existiert eine weitere Form,

⁴ Letztes Glied der kinematischen Kette, häufig das TCPF.

⁵ Die Lage und Orientierung eines Objektes im Raum lässt sich als 3x4-Matrix darstellen. Rechenoperationen erfordern jedoch meist homogene Matrizen der Form nxn. Daher werden die inhomogenen Beschreibungsmatrizen durch die Hinzunahme einer weiteren Dimension zu homogenen Matrizen erweitert.

die CRAIG (1989) als modifizierte DH-Konvention (MDH) bezeichnet. Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der Definition der Gelenkkoordinatensysteme nach der DH-Konvention erläutert (vgl. bspw. PFEIFFER & REITHMEIER 1987).

Die DH-Notation zeichnet sich dadurch aus, dass die Lage eines Frames i durch

- die Länge des Kettengliedes a_i ,
- die Verdrehung des Kettengliedes α_i ,
- die Gelenkverschiebung d_i und
- den Gelenkwinkel θ_i

bestimmt werden kann. Diese Werte werden auch als DH-Parameter bezeichnet.

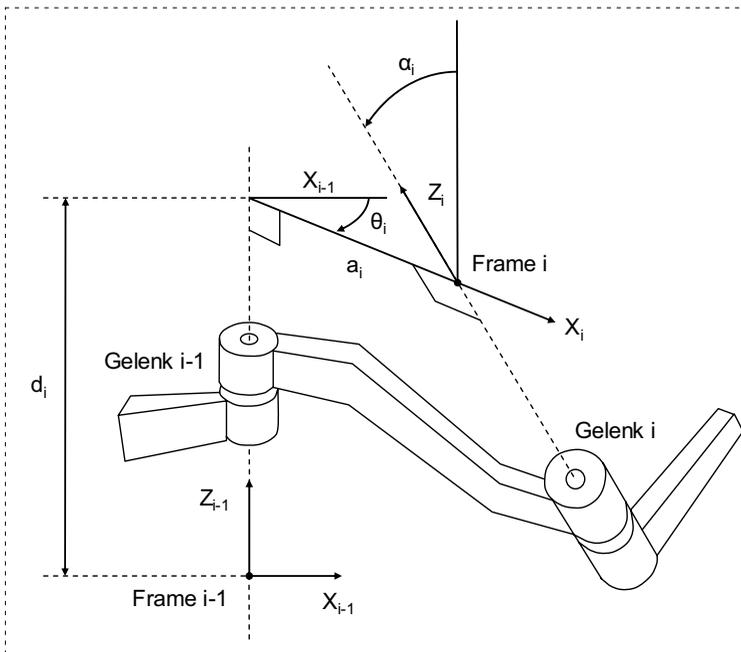


Abbildung 15: Ermittlung der DH-Parameter für einen Beispielmanipulator

Am Beispiel eines in Abbildung 15 visualisierten Manipulators kann die Vorgehensweise zur Bestimmung der DH-Parameter nachvollzogen werden. Zunächst wird in das Gelenk i ein Frame gelegt, bei dem die Z -Achse mit der Rotationsachse übereinstimmt. Durch eine Verdrehung des Gelenks $i-1$ um die Z_{i-1} -Achse um den Winkel θ_i werden die X -Achsen der beiden Frames parallelisiert. Durch eine Verschiebung entlang der Z_{i-1} -Achse um die Länge d_i und eine weitere Verschiebung entlang der X_i -Achse um die Länge a_i werden die beiden Frames in den gleichen Punkt gebracht. Eine weitere Rotation um die X_i -Achse um den Winkel α_i bringt beide Frames zur Deckung.

Für die einzelnen Rotationen und Translationen ergeben sich folgende Teiltransformationen:

$$Rot_{z_{i-1}}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

$$Trans_{z_{i-1}}(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

$$Trans_{x_i}(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

$$Rot_{x_i}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Aus den Formeln (12), (13), (14) und (15) ergibt sich für die Gesamttransformation eines Frames die so genannte DH-Matrix A zu:

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}A &= Rot_{z_{i-1}}(\theta_i) * Trans_{z_{i-1}}(d_i) * Trans_{x_i}(a_i) * Rot_{x_{i-1}}(\alpha_i) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)
 \end{aligned}$$

Die Formel (16) stellt somit die Lage und Orientierung des Gelenks i bezogen auf das Koordinatensystem im Gelenk $i-1$ in Abhängigkeit der Armlängen und Verdrehungen in einer fiktiven Nulllage des Manipulators dar. Sind alle Gelenkwinkel \vec{q} eines Manipulators bekannt, kann die Lage und Orientierung des letzten Gelenks n durch die multiplikative Verknüpfung aller Transformationen

$${}^0_nT = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}A(q_i) \quad (17)$$

bestimmt werden. Im Falle von rotatorischen Gelenken wird der jeweilige Gelenkwinkel q_i dabei in Formel (17) zu jedem θ_i hinzuaddiert. Bei Schubgelenken geschieht die Zuordnung durch die Manipulation von d_i . Die Lösung des kinematischen Problems ist somit für jeden Roboter unabhängig von der Anzahl der Roboterachsen berechenbar.

Bei Sechs-Achs-Robotern kennzeichnet 0_6T die Lage und Orientierung des Flanschframes und 0_7T die des TCPF. Die Transformation 0_7T wird durch die Multiplikation von 0_6T mit einem Werkzeugframe 6_7T oder auch T_{Tool} , welches im Regelfall über keinen weiteren Freiheitsgrad verfügt und somit konstante Werte besitzt, berechnet.

3.2.3.3 Rückwärtstransformation

3.2.3.3.1 Vorbemerkungen

Die Lösung der inversen Kinematik beschäftigt sich mit dem Problem, welche Achswinkel zum Erreichen einer gegebenen Raumlage eingestellt werden müssen. Die Beantwortung dieser Fragestellung ist beispielsweise beim Abfahren einer vorgegebenen Schweißnaht am Bauteil von Bedeutung.

Die Berechnung der Gelenkkoordinaten bei der Rückwärtstransformation ist nicht eindeutig. Zum Erreichen einer Lage des Endeffektors gibt es meist verschiedene Stellungen der kinematischen Kette. Diese werden *Gelenkwinkelkonfigurationen* genannt (EPPINGER & KREUZER 1989). Eine vom Manipulator einge-

nommene Gelenkwinkelkonfiguration wird auch als *Pose* bezeichnet. Die Anzahl möglicher Konfigurationen nimmt mit steigender Komplexität des Manipulators zu (PIEPER & ROTH 1969). Bei Robotern mit sechs Achsen hängt die Anzahl der theoretisch möglichen Lösungen davon ab, wie viele α_i -Parameter in den DH-Matrizen ungleich 0 sind. Für Manipulatoren mit sechs Achsen können bei bestimmten Lagen des Endeffektors bis zu 16 mögliche Gelenkwinkelkonfigurationen auftreten (ROTH et al. 1973, TSAI & MORGAN 1985).

Bei realen Manipulatoren ist für eine gegebene Position im Raum nur ein Teil der gesamten Lösungsmenge auch tatsächlich einstellbar. Dies ist auf Restriktionen, bedingt durch Kollisionen des Manipulators mit sich selbst oder mit Objekten im Arbeitsraum des Roboters, zurückzuführen. Zur Vermeidung von Eigenkollisionen verfügen die Achsen von Industrierobotern in der Regel über mechanische und softwareseitige Winkelbegrenzungen.

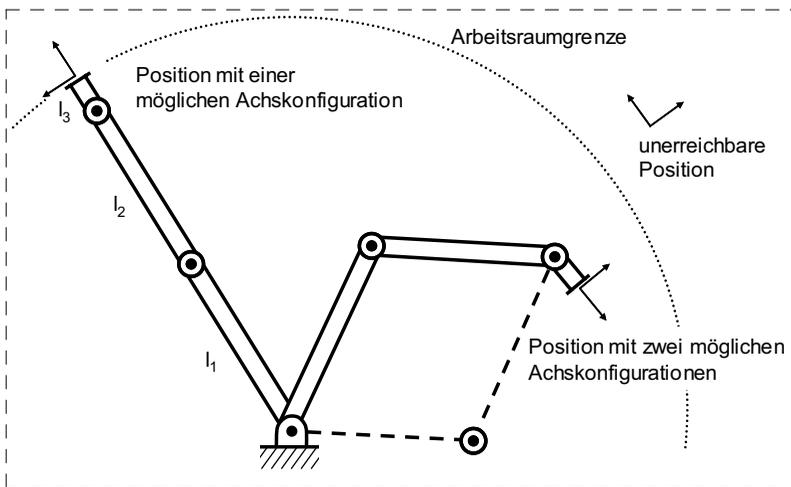


Abbildung 16: Achskonfigurationen für gegebene Positionen und Arbeitsraum eines Manipulators mit drei Gelenken

Wie aus Abbildung 16 deutlich wird, existieren keine gültigen Achswinkelkonfigurationen außerhalb des Arbeitsraums des Roboters, der für das dargestellte Beispiel eines dreiaxigen Manipulators als Kreis mit dem Radius $r = l_1 + l_2 + l_3$ definiert ist. Befindet sich die anzufahrende Position genau auf der Arbeitsraumgrenze, kann diese durch genau eine Gelenkstellung erreicht werden. Es ist dabei

zu beachten, dass in diesem Fall auch nur eine mögliche Orientierung eingenommen werden kann. Für Positionen innerhalb des Arbeitsraums können für den Beispielmanipulator jeweils zwei mögliche Gelenkwinkelstellungen eingestellt werden.

Im Gegensatz zur Vorwärtstransformation existieren für die inverse Transformationsproblematik keine allgemeingültigen Lösungskonzepte, mit denen explizite Bestimmungsgleichungen aufgestellt werden können. Im Regelfall müssen zur Berechnung der Achswinkel nichtlineare Gleichungssysteme gelöst werden (CRAIG 2005, S. 101-105). Die dazu vorhandenen Lösungsansätze lassen sich einteilen in analytische und numerische Verfahren.

3.2.3.3.2 Analytische Verfahren

Unter analytischen Verfahren versteht man Methoden und Ansätze zur Herleitung expliziter Zusammenhänge zwischen der Endeffektorlage und den Gelenkkoordinaten. Sie sind sehr schnell berechenbar, eignen sich allerdings nur für nicht-redundante Robotersysteme. Zudem erfordern sie spezielle Manipulatoranordnungen. Nach CRAIG (2005, S. 106) sind die Voraussetzungen zur analytischen Berechnung zum einen, dass sich Gelenkachsen in einem Punkt schneiden, zum anderen, dass die Anordnung der Gelenke möglichst viele α_i -DH-Parameter mit den Werten Null oder $\pm 90^\circ$ aufweist.

Zur analytischen Berechnung der Rückwärtstransformation existiert eine Reihe von Lösungsverfahren für Roboter mit sechs Achsen.

Methode nach Paul:

Bei der von PAUL (1984) vorgestellten Methode werden kinematische Beziehungen systematisch entwickelt. Aus diesen werden für die Bestimmung der Gelenkwinkel geeignete ausgewählt. Als Basis der Berechnung dient Formel (17), die den Zusammenhang zwischen den Gelenkwinkeln und der zugehörigen kartesischen Position für den Manipulator darstellt (siehe Abschnitt 3.2.3.2). Ausgeschrieben lautet die Formel für einen Sechs-Achs-Roboter:

$${}^0T = {}^0A * {}^1A * {}^2A * {}^3A * {}^4A * {}^5A * {}^6A. \quad (18)$$

Durch Multiplikation der Zielposition 0T mit der Inversen der Transformationsmatrizen ${}^{i-1}A$ ($i=1$ bis 6) ergeben sich folgende Gleichungssysteme:

$$\begin{aligned}
{}^1_6 A &= {}^0_1 A^{-1} * {}^0_6 T, \\
{}^2_6 A &= {}^1_2 A^{-1} * {}^0_1 A^{-1} * {}^0_6 T, \\
{}^3_6 A &= {}^2_3 A^{-1} * {}^1_2 A^{-1} * {}^0_1 A^{-1} * {}^0_6 T, \\
{}^4_6 A &= {}^3_4 A^{-1} * {}^2_3 A^{-1} * {}^1_2 A^{-1} * {}^0_1 A^{-1} * {}^0_6 T, \\
{}^5_6 A &= {}^4_5 A^{-1} * {}^3_4 A^{-1} * {}^2_3 A^{-1} * {}^1_2 A^{-1} * {}^0_1 A^{-1} * {}^0_6 T.
\end{aligned} \tag{19}$$

Wie in Abschnitt 3.2.3.2 dargelegt wurde, beinhalten die Transformationsmatrizen die beschreibenden konstanten Werte des Manipulators sowie Funktionen in Abhängigkeit der Gelenkvariablen q_i . Damit ergibt sich aus (18) und (19) ein System von 72 Gleichungen. Aus diesen können diejenigen ausgesucht werden, die zur Ermittlung der gesuchten Gelenkvariablen q_i geeignet sind. Das Verfahren erfordert nach EPPINGER & KREUZER (1989) einen hohen Grad an Erfahrung bei der Auswahl geeigneter Gleichungen, bietet aber aufgrund seiner Einfachheit Vorteile bei der Berechnungszeit.

Methode nach Lloyd und Hayward:

Die bei LLOYD & HAYWARD (1988) beschriebene Berechnungsmethode stellt eine Variante zu dem Verfahren nach Paul dar. Sie eignet sich allerdings nur für Manipulatoren mit einfacher Gelenkanordnung, bei denen sich mehrere Gelenkachsen in einem Punkt schneiden. Eine hinreichende Bedingung zum Einsatz des Verfahrens ist die Anordnung von drei sich schneidenden Gelenkachsen in einer so genannten Zentralhand. Diese Ausführung ist in der Industrierobotik der Regelfall.

Ausgangspunkt für die Berechnung der inversen Kinematik ist wiederum Formel (17). Bei Manipulatoren, bei denen sich n Gelenke in einem Punkt schneiden, kann dieser Teil von den restlichen Gelenken entkoppelt betrachtet werden. Wird der Anteil der Gelenke, die vor den entkoppelbaren Gelenken liegen, als G_a und der Anteil danach als G_b bezeichnet, so lässt sich (17) darstellen als

$${}^0_6 T = G_a * C * G_b, \tag{20}$$

wobei C den Anteil der entkoppelten Gelenke beinhaltet.

Durch diese Separierung lassen sich für die Teilprobleme G_a und G_b sehr leicht Lösungen ermitteln. Bei Industrierobotern mit Zentralhand reduziert sich die Lösung von G_a auf die Ermittlung von drei Gelenkwinkeln, der Anteil G_b existiert nicht. Damit lassen sich, analog zum Verfahren nach Paul, Bestimmungsgleichungen für den Anteil C ermitteln nach

$$C = G_a^{-1} * {}_6^0 T. \quad (21)$$

Durch die Zerlegung des Problems in zwei Teilaufgaben erhält man, im Gegensatz zum Verfahren nach Paul, wesentlich übersichtlichere Gleichungssysteme.

Weitere Verfahren:

Zur Bestimmung der inversen Kinematik auf analytischem Wege sind eine Reihe weiterer Verfahren bekannt. LEE et al. (1983) zeigt beispielsweise ein Verfahren auf, bei dem zur Ermittlung der Gelenkwinkel geometrische Betrachtungen herangezogen werden. Allerdings ist die Herleitung der Gleichungen sehr kompliziert und eignet sich daher lediglich für einfache Manipulatorenanordnungen (EPPINGER & KREUZER 1989). WOERNLE (1987) zeigt eine Methode, die auf sechs nichtlinearen Schließbedingungen basiert.

Analytische Verfahren sind hinsichtlich der Berechnungszeit äußerst effizient (CRAIG 2005, S. 106f., EPPINGER & KREUZER 1989) und in der Lage, alle existierenden Gelenkwinkelkonfigurationen zu ermitteln. Nachteilig ist, dass sie im Allgemeinen lediglich auf einfache, nicht-redundante Roboterstrukturen anwendbar sind. Allerdings existieren Ansätze, bei denen analytische Lösungsmethoden auch für redundante Robotersysteme verwendet werden können (KAUSCHKE 1996). Dabei werden zusätzliche Randbedingungen für die Gelenkkonfiguration, beispielsweise in den Arbeiten von IVLEV & GRÄSER (1997) durch Einführung imaginärer Gelenke, formuliert. Dadurch werden zusätzliche Zwangsbedingungen definiert, die eine analytische Lösung der Problemstellung ermöglichen.

3.2.3.3 Numerische Verfahren

Numerische Verfahren zur Ermittlung der inversen Kinematik ermitteln eine Näherungslösung für die gesuchten Achswinkel. Dazu ist ein Startwert notwendig, anhand dessen für eine Lageänderung die entsprechenden Winkel mit Hilfe von Iterationsverfahren angenähert werden. Numerische Verfahren sind in der Regel nur in der Lage, eine gültige Gelenkwinkelkonfiguration zu finden.

Für die numerische Berechnung der inversen Kinematik ist eine Reihe von Verfahren bekannt. MILENKOVIC & HUANG (1984) stellen beispielsweise eine Methode vor, die auf einer Separierung des Manipulators in Teilketten beruht. Daher ist das Verfahren lediglich für einfache Kinematiken geeignet und wird auch als *Discrete Linkage Method* bezeichnet.

Die meisten numerischen Verfahren basieren auf der Verwendung der Jacobi-Matrix J (YOSHIKAWA 1990, S. 53 ff., FURUSHO & ONISHI 1985). Aus dem allgemeinen Zusammenhang zwischen eingestellten Gelenkwinkeln q und der sich ergebenden Position x

$$x = f(q) \quad (22)$$

kann durch Ableiten das Problem dargestellt werden als

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (23)$$

Die Jacobi-Matrix $J(q)$ beschreibt dabei die Bewegung der Position x durch kleine Änderungen von q durch partielle Ableitungen. Dadurch ist Gleichung (23) eine Linearisierung von Gleichung (22) und kann umgestellt werden zu

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{x}. \quad (24)$$

Durch numerische Integration der Gleichung (24) kann eine Lösung für die Gelenkwinkel bestimmt werden. Allerdings kann die Inverse der Jacobi-Matrix J^{-1} nur für nicht redundante Systeme aufgestellt werden, da sie ansonsten keine quadratische Form besitzt.

Zur Lösung des Problems für redundante Kinematiken wird meist die Moore-Penrose-Pseudoinverse J^+ der Jacobi-Matrix (GOLUB & VAN LOAN 1983) verwendet. Dadurch lässt sich Gleichung (24) allgemein darstellen als

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + (I - J^+ J)v, \quad (25)$$

mit

$$J^+ = J^T (JJ^T)^{-1} \quad (26)$$

und der Identitätsmatrix⁶ I . Der Vektor v ist frei wählbar.

Die rechte Seite von Gleichung (25) besteht aus zwei Termen. Der erste gibt eine mögliche Gelenkwinkelkonfiguration für ein redundantes System an. Der zweite Teil beschreibt die so genannte Eigenbewegungs-Mannigfaltigkeit (engl.: *self moving manifold*) (RUEHL & ROTH 2006). Das bedeutet, dass bei beliebiger Ein-

⁶ Die Identitätsmatrix wird auch als Einheitsmatrix bezeichnet. Sie ist quadratisch und besteht in der Hauptdiagonalen nur aus Einsen. Die restlichen Elemente sind null.

stellung von v der Manipulator eine Eigenbewegung durchführt, ohne dabei die Lage und Orientierung des TCPF zu verändern. Durch geschickte Wahl von v kann die Eigenbewegung des Roboters dazu verwendet werden, eine gegebene Verfahrbewegung hinsichtlich vorgegebener Kriterien zu optimieren. Beispielsweise zeigt LIEGEOIS (1977) die Möglichkeit zur Definition eines positionsabhängigen Kriteriums, durch das Gelenkwinkelgrenzen bei der Bewegung eines Manipulators nicht verletzt werden.

Wie aus diesen Grundlagen deutlich wird, ist die Berechnung der Rückwärts-Transformation von redundanten Robotersystemen nicht eindeutig und mathematisch nicht trivial. Entsprechend schwierig gestaltet sich auch die Programmierung von derartigen Systemen, bei der eine Vielzahl von Stützpunkten für eine Bahnbewegung erzeugt und das Verhalten des Manipulators entlang der Bahn kontrolliert werden muss.

3.3 Programmierung von Industrierobotern

3.3.1 Ziele und Inhalte der Programmierung

Die Programmierung eines Roboters beinhaltet die Übersetzung einer abstrakten Aufgabenstellung in konkrete Bewegungs- und Schaltbefehle. Das Vorgehen kann dabei in die drei Teilbereiche *Aufgabenplanung*, *Pfadplanung* und *Trajektorienplanung* gegliedert werden (siehe Abbildung 17).

Anhand der gegebenen Aufgabe werden Einzelanweisungen abgeleitet, die anschließend durch programmierte Pfade erfüllt werden können. Als Beispiel sei hier die geometrische Festlegung von Schweißnähten an einem Bauteil durch eine Folge anzufahrender Punkte genannt. Die Punkte werden in einem zweiten Schritt durch einen Pfad miteinander verbunden. Ein Pfad ist eine Kurve im kartesischen Raum oder im Konfigurationsraum eines Roboters. Dabei ist meist das TCPF Gegenstand der Pfadbeschreibung. Bei der Wahl des Pfades müssen neben den aufgabenspezifischen Randbedingungen weitere Eigenschaften, wie beispielsweise die Kollisionsfreiheit, berücksichtigt werden. Da die Pfadplanung die Bewegung für eine vollständige Aufgabe betrachtet, wird sie häufig auch als globale Bahnplanung bezeichnet (MARKUS 2001, S. 11 ff., BENZ 1999, S. 60). Der Fokus liegt meist auf der Generierung von kollisionsfreien Pfaden, die durch Stützpunkte im Raum definiert werden. Ein Pfad reflektiert somit die geometrischen Randbedingungen einer Aufgabe (CONSTANTINESCU 1998).

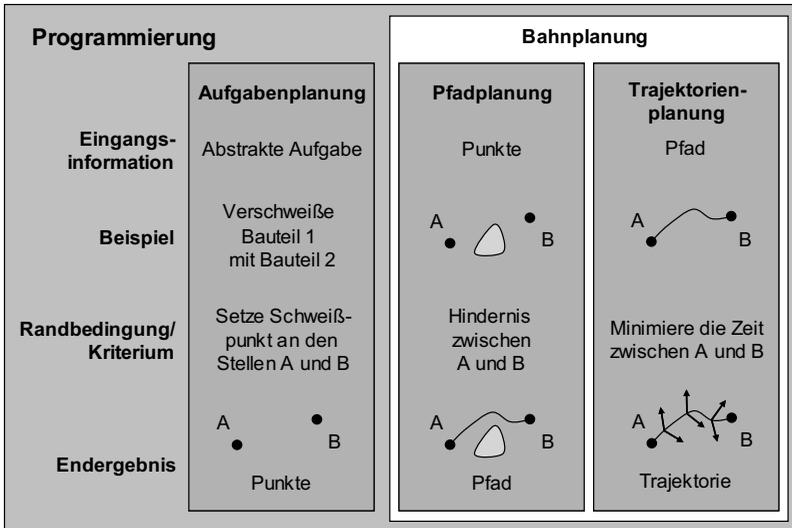


Abbildung 17: Abgrenzung der Begriffe Aufgaben-, Pfad- und Trajektorienplanung anhand eines Beispiels. Alle drei Teilbereiche bilden zusammen die Aufgaben der Roboterprogrammierung.

Der Pfad selbst beinhaltet keine Informationen hinsichtlich des zeitlichen Verhaltens beim Abfahren durch den Roboter. Eine Zuweisung diesbezüglicher Daten wird erst in einem dritten Schritt durch die Generierung einer Trajektorie vorgenommen. Eine Trajektorie beinhaltet zusätzliche zeitliche Informationen der Bahn (HWANG & AHUJA 1992) und berücksichtigt somit die Dynamik des Systems (KRÖGER et al. 2006, CONSTANTINESCU 1998). Die Gesamtheit der Pfad- und Trajektorienplanung wird als Bahnplanung bezeichnet (MARKUS 2001, S. 11).

Der Vorgang der Programmierung findet heute üblicherweise durch manuelle Benutzereingaben statt. Dazu stehen verschiedene konventionelle Methoden zur Verfügung, die im nächsten Abschnitt behandelt werden. Aufgrund des hohen Aufwands zur manuellen Erstellung von Programmen wurden in den letzten Jahrzehnten große Anstrengungen unternommen, um Teile der Programmierung zu automatisieren. Die wichtigsten Ansätze zur automatischen Bahnplanung werden im Abschnitt 3.3.3 betrachtet.

3.3.2 Konventionelle Programmierung und Bewegungsoptimierung

Das Ziel der Programmierung von Industrierobotern ist die Übersetzung einer abstrakten Aufgabenstellung, die in den meisten Fällen durch ein gewisses Maß an Freiräumen zur Lösung charakterisiert werden kann, in einfache und konkrete Anweisungen des Manipulators. Im industriellen Einsatz werden meist alle notwendigen Schritte zur Erstellung und zum Test eines Programms manuell durchgeführt. Das Ergebnis der Programmierung ist somit stark von der Erfahrung und Intuition des Anwenders abhängig. Zur Programmierung von Industrierobotern stehen dem Anwender zwei konventionelle Methoden zur Verfügung.

Die erste Methode wird als *Online-Programmierung* bezeichnet (WECK & BRECHER 2005, S. 572 ff.). Dabei bewegt der Benutzer den Roboter mit Hilfe eines Handbediengerätes an die gewünschte Position und speichert die eingenommene Pose ab. Zur Bestimmung des Bewegungsverhaltens zwischen zwei Positionen wird eine Interpolationsvorschrift festgelegt. Üblicherweise stehen dafür Funktionen zur Geraden-, Kreis- und Spline-Interpolation zur Verfügung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, eine Punkt-zu-Punkt-Bewegung (PTP) einzustellen, bei der alle Achsen des Manipulators von der gegenwärtigen Pose in eine Ziellage gebracht werden. Die Kriterien zur Interpolation von PTP-Bewegungen sind herstellerspezifisch und zielen meist auf eine schnellstmögliche Lageänderung ab. Aktionen, wie beispielsweise das Einschalten eines Lasers an der Bearbeitungsstelle, wird über entsprechende Befehle in alpha-numerischer Form mittels einer Tastatur eingegeben.

Bei der zweiten Methode wird die Programmierung nicht direkt am realen Roboter vorgenommen, sondern anhand einer rechnerbasierten Abbildung der Produktionsanlage. Diese Art der Programmerstellung wird als *Offline-Programmierung* bezeichnet (WECK & BRECHER 2005, S. 572 ff.). Am häufigsten werden dazu 3D-Kinematiksimulationsumgebungen eingesetzt, die das Bewegungsverhalten des Roboters genau nachbilden können. Die Verwendung von Offline-Simulationswerkzeugen bietet die Möglichkeit, das Layout von Anlagen zu planen sowie die Erreichbarkeit von relevanten Punkten im Arbeitsraum virtuell zu testen. Des Weiteren können Bewegungsstudien, beispielsweise zur Ermittlung der Taktzeit, bereits vor der Realisierung einer Anlage durchgeführt werden. Die Erzeugung von Bewegungspfaden geschieht dabei analog zu den Online-Verfahren durch die manuelle Vorgabe von Stützpunkten.

In vielen Fällen ist es zusätzlich notwendig, das Bewegungsverhalten des Roboters entlang eines programmierten Pfades hinsichtlich vorgegebener Kriterien zu optimieren. In der industriellen Produktion spielt die Minimierung der Bearbeitungszeit eine herausragende Rolle, da diese die Produktivität einer Anlage direkt beeinflusst. Zur Reduktion der Taktzeit wird versucht, die Teile eines Bewegungspfades, bei denen lediglich eine schnelle Lageänderung notwendig ist, möglichst zu verkürzen und zu glätten. Als Beispiel für eine solche Bewegung sei an dieser Stelle die Versatzbewegung zwischen zwei Schweißpunkten genannt, die möglichst schnell auszuführen ist (siehe Abbildung 18). Die Bahnverbesserung beruht auf der manuellen Verschiebung von Pfadstützpunkten des TCPF im Raum.

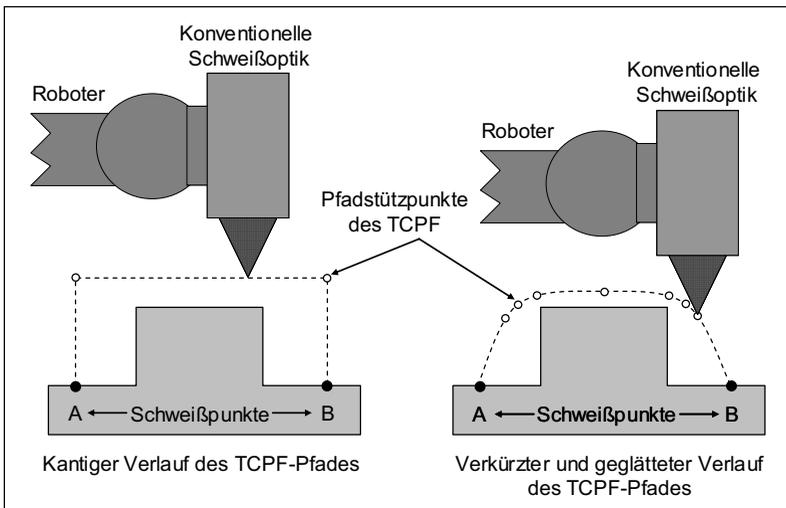


Abbildung 18: Taktzeitverbesserung durch Verkürzung und Glättung des Bewegungspfades zwischen zwei Punkten A und B bei Werkzeugen mit kleinen Abmessungen

Beim konventionellen Laserstrahlschweißen liefert diese Vorgehensweise durchaus akzeptable Ergebnisse. Aufgrund der kurzen Werkzeugabstände zum Flanschframe und der damit verbundenen Kollisionsproblematik mit dem Bauteil kann die Bewegungsführung entlang des TCPF-Pfades hauptsächlich durch eine Lageänderung der Optik vorgenommen werden (im Gegensatz zu einer Änderung ihrer Orientierung). Dadurch sind der Bewegungspfad der Schweißoptik und der des TCPF in ihrer Gestalt und Länge nahezu identisch. Da die Lageänderung der

Optik zu einem großen Teil nur durch die Gelenkwinkeländerungen der langsamen Hauptachsen des Roboters realisiert werden kann, wirkt sich eine Verkürzung und Glättung des TCPF-Pfades positiv auf die Taktzeit aus.

Anders stellt sich die Situation beim RLS dar. Aufgrund der langen Abstände zwischen der Bearbeitungsoptik und dem Bauteil kann die Versatzbewegung des TCPF effektiver durch eine Änderung der Orientierung des Werkzeuges erreicht werden. Die Lageänderung der Schweißoptik kann dabei einen deutlich geringeren Anteil an der Gesamtbewegung einnehmen. Im Extremfall bleibt die Schweißoptik an der gleichen Position und ändert lediglich ihre Orientierung. Für die Dauer einer Versatzbewegung zwischen zwei Positionen spielt somit die Länge und Gestalt des TCPF-Pfades nur eine untergeordnete Rolle. Vielmehr ist ein Bewegungspfad für die Schweißoptik zu suchen, der eine schnelle Orientierungsänderung und gleichzeitig eine geeignete globale Positionsänderung der Optik ermöglicht. Für eine derartige Bewegungsführung sind allerdings heute aus dem Bereich der konventionellen Programmiermethoden keine Werkzeuge bekannt.

Bei Schweißaufgaben, die üblicherweise aus über 50 und mehr Nahtelementen bestehen, ist eine Optimierung mit konventionellen Methoden des Ausprobierens von Lösungen nicht mehr zu bewältigen. Im industriellen Umfeld, welches fast ausschließlich durch manuelle Roboterprogrammierung mit konventionellen Methoden gekennzeichnet ist, besteht daher ein enormer Bedarf, die Planung und Optimierung einer Roboterbewegung soweit wie möglich zu automatisieren. Dazu kommen rechnerbasierte Methoden zur automatischen Bahnplanung zum Einsatz.

3.3.3 Automatische Bahnplanung und –optimierung

3.3.3.1 Vorbemerkungen

Innerhalb der Robotik stellt die automatische Bahnplanung seit mehr als 30 Jahren ein wichtiges Forschungsfeld dar. Das Attribut „automatisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Roboterbahnen nach definierten Zielen durch Algorithmen erzeugt werden. Zur Berechnung kommen Computerwerkzeuge zum Einsatz.

Die automatische Bahnplanung ist sowohl für redundante als auch für nicht redundante Manipulatoren sowie für stationäre und mobile Roboter von Bedeu-

zung. Bahnplanungsverfahren werden nach ihrer Zielsetzung und den eingesetzten Algorithmen eingeteilt (MARKUS 2001, S. 11 ff., BENZ 1999, S. 60, HWANG & AHUJA 1992). Bei der Bahnplanung wird unterschieden, ob ein Pfad initial ermittelt (globale Bahnplanung) oder ob die Roboterbewegung anhand eines vorgegebenen Pfades optimiert werden soll (lokale Bahnplanung).

3.3.3.2 Globale Bahnplanung

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Planungsmethoden und Algorithmen zur Bestimmung von Bewegungspfaden für Robotersysteme. Der Fokus der meisten Algorithmen dieser Klasse liegt dabei auf der Ermittlung von kollisionsfreien Pfaden in Umgebungen mit statischen Hindernissen (siehe OJDANIC et al. 2006) oder dynamischen Objekten (siehe RÜCKEL 2006). Im Bereich der mobilen Robotik, also von Systemen, die ihre Basis bezüglich eines globalen Koordinatensystems selbständig verändern können, spielt die Navigation durch eine Reihe von Hindernissen eine zentrale Rolle (siehe Arbeiten von YE & BORENSTEIN 2004, LEROY et al. 2002, SUGIHARA & SMITH 1999). Bei mobilen Manipulatoren ist zudem die Fragestellung interessant, wie mehrere Robotersysteme in der gleichen Umgebung kollisionsfrei miteinander agieren können (siehe dazu BENNEWITZ & BURGARD 2000, AZARM & SCHMIDT 1997).

Die Verfahren, die zur Berechnung eingesetzt werden, lassen sich anhand des Betrachtungsraums in kartesische und konfigurationsraumbezogene Planungsverfahren unterteilen (OJDANIC et al. 2006, SANCHEZ & LATOMBE 2002). Bei den kartesischen Verfahren läuft die Berechnung innerhalb des euklidischen Arbeitsraums des Manipulators ab. Bei konfigurationsraumbezogenen Planungsverfahren wird die Planung innerhalb des Gelenkwinkelraums des Roboters durchgeführt. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass die Bewegung einer kinematischen Kette als Punktbewegung abgebildet werden kann. Nachteilig sind dabei die extrem aufwändige Abbildung von Hindernissen im Konfigurationsraum und die schwierige Handhabung von mehr als drei Gelenkachsen. Daher eignen sich konfigurationsraumbezogene Berechnungsmethoden in der Praxis hauptsächlich für mobile Robotersysteme, die nur über wenige manipulatorische Freiheitsgrade verfügen (OJDANIC et al. 2006).

Zur Planung von kollisionsfreien Pfaden innerhalb der jeweiligen Betrachtungsräume wird in der Literatur eine Reihe von Ansätzen diskutiert. Die wichtigsten Verfahren zur Ermittlung von Pfaden sind die Landkartenmethode, die Zellzerlegungsmethode und die Potentialfeldmethode (RUEHL & ROTH 2006, RÜCKEL

2006, S. 57). Einen sehr guten Überblick dazu gibt beispielsweise LATOMBE (1991).

Dass neben der Berechnung von kollisionsfreien Pfaden bei der globalen Bahnplanung für die Industrierobotik nur selten weitere Optimierungskriterien berücksichtigt werden, liegt maßgeblich daran, dass die aufgabenspezifische Redundanz nur in geringem Maße nutzbar ist (ZIMMERMANN & SONNER 2008). Die Verwendung von globalen Verfahren zur Planung von zeitoptimalen Bewegungen wird in der Literatur daher auch meist nur für nicht redundante Systeme behandelt. Die Ansätze verfolgen dabei das Ziel, analog zur manuellen Optimierung (vgl. Abschnitt 3.3.2), den TCPF-Pfad zu verkürzen und zu glätten (siehe beispielsweise CONSTANTINESCU 1998, RAJAN 1985). Algorithmen, die zeitoptimale Pfade innerhalb der globalen Bahnplanung für hochredundante Systeme, wie sie beim Remote-Laserstrahlschweißen vorliegen, zu ermitteln erlauben, sind nicht bekannt.

3.3.3.3 Lokale Bahnplanung

Gegenstand der lokalen Bahnplanung sind redundante Robotersysteme und deren Bewegungsoptimierung bei bekannten Pfadstützpunkten. Dabei wird unterschieden, ob der Pfad und die Orientierung auf dem Pfad zwischen zwei Stützpunkten eingehalten werden muss (engl.: *path constrained*) oder ob lediglich eine Start- und eine Endlage erreicht werden muss (engl.: *Point-to-Point*) (CONSTANTINESCU 1998, S. 4 ff.).

Die Redundanz und die damit zur Verfügung stehende Mannigfaltigkeit von Achsstellungen für eine vorgegebene Raumposition erlaubt die Definition von Nebenkriterien bei der Ermittlung des Bewegungsverhaltens. Die Ziele, die Algorithmen dieser Klasse verfolgen, decken ein breites Spektrum an Fragestellungen ab. Folgende Ansätze zeigen lediglich einen Auszug aus einem extrem breiten Forschungsfeld, der keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt:

- Minimierung des Energieverbrauchs (vgl. MOLL & KAVRAKI 2004, SHILLER 1994, WAPENHANS et al. 1994, WANG & HAMAM 1992),
- Minimierung des Rucks in den Gelenken (vgl. SIMON 1993, KYRIAKOPOULOS & SARIDIS 1988, 1994),
- Minimierung der Getriebemomente (vgl. HOLLERBACH & SUH 1985),

- Vermeidung von Singularitäten (vgl. LLOYD 1995, CHEVALLEREAU & DAYA 1994, POHL & LIPKIN 1991) und
- Vermeidung von Gelenkwinkelgrenzen (vgl. ZHOU & NGUYEN 1997b, CHAN & DUBEY 1995).
- Bei hochredundanten Systemen ist die Optimierung nach verschiedenen (gewichteten) Kriterien interessant. Ansätze dazu zeigen beispielsweise SCHREIBER (2004) oder CLEARY & TESAR (1990).

Die Ansätze behandeln meist redundante Robotersysteme oder nicht redundante Anlagen mit reduziertem Ergebnisraum. Ein Großteil dieser Algorithmen verwendet dabei die Moore-Penrose-Inversion der Jacobi Matrix (vgl. Abschnitt 3.2.3.3.3). Dabei werden durch den frei wählbaren Vektor v aus der Formel (25) (siehe S. 38 f.) Randbedingungen an die Ermittlung der inversen Kinematik gestellt.

Die Problemstellung der zeitoptimalen Bewegungsplanung von Manipulatoren wurde in der Vergangenheit von einer Reihe von Autoren adressiert (siehe beispielsweise LEE 1992, VON STRYK & SCHLEMMER 1992, CHEN 1991). Die meisten Arbeiten beschäftigen sich dabei mit der Planung von zeitoptimalen PTP-Bewegungen. Diese Fragestellung ist für eine Reihe von Applikationen von Interesse, bei denen eine schnelle Lageänderung von einer Pose zur nächsten, also beispielsweise bei einer Versatzbewegung zwischen zwei Schweißnähten, gewünscht wird. Methoden, die zur zeitoptimalen Planung eingesetzt werden, basieren auf Suchalgorithmen im Gelenkwinkelraum (siehe RAJAN 1985), auf der Optimierung mittels eines Minimalkriteriums (siehe BOBROW 1988) oder auf der Betrachtung der dynamischen Eigenschaften des Manipulators (siehe SHILLER 1994). Häufig werden Methoden der Variationsrechnung (siehe beispielsweise ZHOU & NGUYEN 1997a, KIM et al. 1994) oder Pontryagin's Maximum-Prinzip und dessen Anwendung durch Suchtechniken auf der Basis der Theorie der Optimalsteuerungen eingesetzt. SAHAR & HOLLERBACH (1985) wenden beispielsweise Suchalgorithmen innerhalb des Gelenkwinkelraumes an. HEINZINGER et al. (1990) zeigen Methoden, bei denen im kartesischen Raum nach der optimalen Lösung gesucht wird.

Eine wichtige Aufgabenstellung im Umgang mit redundanten Robotersystemen ist die Ermittlung von zeitoptimalen Roboterbewegungen, bei denen entlang des Pfades Randbedingungen eingehalten werden müssen (*engl.: path constrained*). Beim Laserstrahlschweißen sind solche Bedingungen beispielsweise, dass der

Brennfleck exakt der vorgegebenen Nahtkontur mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit und Einstrahlwinkellage folgen muss. Hierzu finden sich Arbeiten auf Basis der Theorie der Optimalsteuerungen (BREUN & CALLIES 2006) oder der flexiblen Toleranzmethode (CONSTANTINESCU & CROFT 2000).

Die genannten Arbeiten entstammen zum überwiegenden Teil aus der akademischen Forschung und hielten bislang nur sehr begrenzt Einzug in die industrielle Anwendung. Sie beschäftigen sich mit der wichtigen Fragestellung, wie die kinematische Redundanz unter der Randbedingung, dass die Bewegung zwischen zwei Punkten oder entlang eines Pfades möglichst zeitoptimal verläuft, aufgelöst werden kann. Allerdings sind keine Lösungen bekannt, die mit der beim Remote-Laserstrahlschweißen charakteristischen kinematischen und aufgabenspezifischen Redundanz umzugehen vermögen. Dies ist auch verständlich, da lokale Bahnplanungsalgorithmen einen Pfad oder zumindest dessen Stützpunkte als gegeben voraussetzen. Die aufgabenspezifische Redundanz erlaubt es allerdings, die Pfade selbst innerhalb eines breiten Lösungsraums zu variieren.

Der einzige bekannte Ansatz, der speziell für die Fragestellungen des Remote-Laserstrahlschweißens entwickelt wurde, stammt von CHIBISOV & MAYR 2007a, 2007b). Die Autoren behandeln in ihren Arbeiten die Suche nach optimalen Einstrahlwinkeln für einen zeitoptimalen Versatz zwischen zwei Schweißnähten. Der betrachtete Anlagentyp beinhaltet einen Industrieroboter mit sechs Achsen sowie eine Schweißoptik mit fester Brennweite. Die Berechnungsmethodik verwendet dabei parametrisierte Einstrahlwinkel und Geschwindigkeitsräume unter Verwendung der Moore-Penrose-Pseudoinversion von Matrizen mit polynominalen Einträgen. Allerdings bezieht der Ansatz den translatorischen Freiheitsgrad der Tiefenschärfetoleranz nicht mit ein. Zudem wird die Topologie der Schweißaufgabe, wie die Reihenfolge von Schweißnähten, bei der Optimierung nicht berücksichtigt. Für kinematisch redundante Systeme, wie roboterbasierte Anlagen mit Zoomoptiken oder Scanneroptiken, wurden die Algorithmen bislang nicht erweitert. Zudem steht eine Erprobung für industrielle Anwendungen noch aus, sodass keine Aussagen zu der Leistungsfähigkeit des Berechnungsansatzes vorliegen.

3.4 Fazit und Handlungsbedarf

Innerhalb des Grundlagenteils in Abschnitt 3.2 in diesem Kapitel wurde dargestellt, dass die Lösung der inversen Kinematik für redundante Robotersysteme mehrdeutig ist. Für eine gegebene Position im Raum sind bei diesen somit unendlich viele Gelenkwinkelstellungen (Posen) des Roboters möglich. Da eine Folge

von Posen für die Gesamtbewegung entlang eines Pfades maßgeblich die notwendige Zeit bestimmt, ist die Programmierung geeigneter Roboterposen für eine zeitoptimale Roboterbewegungen beim Remote-Laserstrahlschweißen entscheidend. Der Abschnitt 3.3 charakterisierte die verfügbaren Programmierverfahren für Robotersysteme. Die gezeigten konventionellen Methoden der Online- und Offline-Programmierung sind durch einen hohen Grad an manueller Interaktion geprägt. Das Ergebnis einer Programmierung wird deshalb maßgeblich durch den Anwender bestimmt. Die konventionellen Verfahren, die heute im industriellen Umfeld eingesetzt werden, bieten kaum Möglichkeiten zum Umgang mit kinematischer und aufgabenspezifischer Redundanz. Die Optimierung einer Roboterbewegung im Sinne einer Verbesserung unter Einsatz begrenzter Ressourcen kann lediglich durch langwieriges Ausprobieren von Posen erreicht werden.

Zur Vereinfachung der zeitoptimalen Programmierung wurden bekannte rechnerbasierte Bahnplanungsverfahren untersucht. Methoden der globalen Bahnplanung, also die Bestimmung von Pfaden des TCPF, adressieren hauptsächlich die Problematik der Kollisionsvermeidung. Ansätze zur Bestimmung von zeitoptimalen Bewegungen fokussieren die Verkürzung und Glättung des TCPF-Pfades.

Die Algorithmen der lokalen Bahnplanung beschäftigen sich mit pfadbezogenen Optimierungsproblemen. Es wurden Ansätze gezeigt, die PTP-Bewegungen und Bewegungen entlang eines definierten Pfades hinsichtlich eines vorgegebenen Kriteriums, wie minimaler Energieverbrauch oder minimaler Ruck, zu optimieren erlauben. Arbeiten, die sich mit der Zeitoptimalität beschäftigen, verwenden häufig Methoden der Theorie der Optimalsteuerungen auf der Basis von Pontryagin's Maximum-Prinzip. Die Arbeiten beziehen sich allerdings meist nur auf kinematisch redundante Robotersysteme. Die aufgabenspezifische Redundanz wird für einen direkten Einsatz für die Optimierung beim Remote-Laserstrahl-schweißen nur unzureichend berücksichtigt.

Es lässt sich somit zusammenfassend feststellen, dass zur Programmierung und Optimierung von Remote-Laseranlagen keine Methoden und Werkzeuge zur Verfügung stehen, die den Anforderungen der betrieblichen Praxis gerecht werden. Um das Potential der Remote-Technologie auszuschöpfen, müssen daher Berechnungsverfahren entwickelt werden, die für eine gegebene Schweißaufgabe eine taktzeitoptimale Bewegungsbahn des Roboters bestimmen. Dabei sollen die Freiheitsgrade der Anlagentechnik sowie des Schweißprozesses ausgenutzt werden. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an ein Optimierungswerkzeug:

- Die Bewegungsabläufe müssen durch einen Algorithmus derart berechnet werden, dass Versatzzeiten zwischen den Schweißnähten minimiert werden. Dabei ist es wichtig, nicht nur einzelne Versatzbewegungen zu optimieren, sondern die Topologie der Gesamtaufgabe zu berücksichtigen.
- Der Berechnungsmethodik muss in der Lage sein, Roboterbahnen nur innerhalb der definierten Lösungsräume zu erzeugen. Als Schranken dienen maximal zulässige Einstrahlwinkel in stechender, schleppender und lateraler Richtung sowie maximal zulässige Fokuslagenabweichungen in Strahlrichtung (Rayleighlänge). Zusätzlich kann die Schweißnahtreihenfolge zur Verbesserung der Gesamtbewegung verändert werden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Reihenfolge einer Verschweißung einen hohen Einfluss auf den Verzug eines Bauteils ausüben kann. Schweißreihenfolgen, die geringe Verzüge verursachen, können mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ermittelt werden (vgl. bspw. ZAEH et al. 2008, ZAEH et al. 2005).
- Die Gültigkeit einer berechneten Roboterbahn wird durch die Erreichbarkeit jedes Punktes auf der Bahn bestimmt. Daneben muss das programmierte zeitliche Bahnverhalten mit dem Potential der Bewegungsmaschine übereinstimmen. Dieses wird durch die erlaubte maximale Geschwindigkeit, die höchstmögliche Beschleunigung sowie den Ruck⁷ der Antriebe charakterisiert. Die Berechnungsmethoden müssen diesen Randbedingungen bei der Ermittlung von Bahnen Rechnung tragen.
- Die Berechnungszeit zur Lösungsfindung entscheidet stark über die Einsatzfähigkeit von Algorithmen in der Praxis. Diese sollte für mittelgroße Schweißaufgaben bis 50 Schweißnähte nicht größer sein als 20 Minuten. Zudem sollten die Algorithmen derart spezifiziert werden, dass die Berechnungszeit lediglich linear mit der Anzahl der Schweißnähte steigt.

In dieser Arbeit werden Algorithmen für Anlagenkonzepte mit Werkzeugen mit fester und variabler Brennweite entwickelt. Die jeweiligen Konzepte werden in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellt. Anhand zweier Anwendungsbeispiele wird die Leistungsfähigkeit der entworfenen Berechnungsmethoden im Kapitel 6 ermittelt.

⁷ Der Ruck ist die Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit.

4 Bahnplanungsalgorithmen für Remote-Anlagen mit Optiken fester Brennweite

4.1 Konzept der Optimierung

4.1.1 Vorüberlegung und Optimierungsansatz

Die Bahnplanung beim RLS stellt für den Fall der Zielsetzung einer minimalen Bearbeitungszeit eine komplexe Problemstellung dar. Die kinematische Redundanz der Laseranlage sowie die Reduzierung der Dimension des Ergebnisraums durch die Toleranz des Schweißprozesses gegenüber Positionierungsabweichungen (vgl. Abschnitt 2.2 sowie Abbildung 12, S. 26), ermöglichen eine unendlich große Anzahl an Bewegungspfaden für einen Schweißroboter.

Ein Ansatz, um den Bewegungsverlauf eines Schweißroboters hinsichtlich optimaler Ausführungszeit zu planen, besteht in der Verkürzung und Glättung des Pfades des TCPF (vgl. CONSTANTINESCU & CROFT 2000, RAJAN 1985). Kantige Bewegungsverläufe zwingen den Manipulator zum abrupten Abbremsen, so dass glatte bzw. abgerundete Pfade eine deutlich schnellere Bewegung zwischen den Pfadstützpunkten ermöglichen. Bekannte Arbeiten aus der Literatur behandeln Roboteranlagen, bei denen das Werkzeug relativ kleine Abmessungen besitzt. Dadurch sind an einer Lageänderung des TCPF in der Regel alle Roboterachsen beteiligt (siehe Abschnitt 3.3.2). Eine Verkürzung und Glättung der TCPF-Bahn, die beispielsweise durch eine Optimierung der Schweißreihenfolge erzielt werden kann, führt somit zu einer Verbesserung der Taktzeit und damit indirekt zu einer Berücksichtigung der Roboterdynamik.

Beim RLS kann allerdings mit den Roboterhandachsen aufgrund der langen Brennweite eine Versatzbewegung schneller realisiert werden als mit den Hauptachsen (vgl. Abbildung 14, S. 30). Daher ist eine reine Verkürzung der TCPF-Bahn zwar sinnvoll, aber nicht ausreichend, um die dynamischen Vorteile der einzelnen Achsen voll auszuschöpfen. Für eine taktzeitoptimierte Versatzbewegung des Fokuspunktes ist es wünschenswert, wenn diese hauptsächlich durch die leichteren und damit schnelleren Roboterhandachsen durchgeführt wird. Die massereicheren Hauptachsen unterstützen dabei diese Bewegung durch eine günstige Vorpositionierung der Schweißoptik. Um eine derartige Bewegung zu erhalten, verfolgt dieses Kapitel den Ansatz, die Bewegungsplanung des Robo-

ters anhand des Bewegungspfad der Schweißoptik durchzuführen (im Gegensatz zu einer Planung des TCPF-Pfades). Die Position der Optik wird dabei durch den Schnittpunkt der Z-Achse des Flansch-Frames mit der Strahlachse definiert.

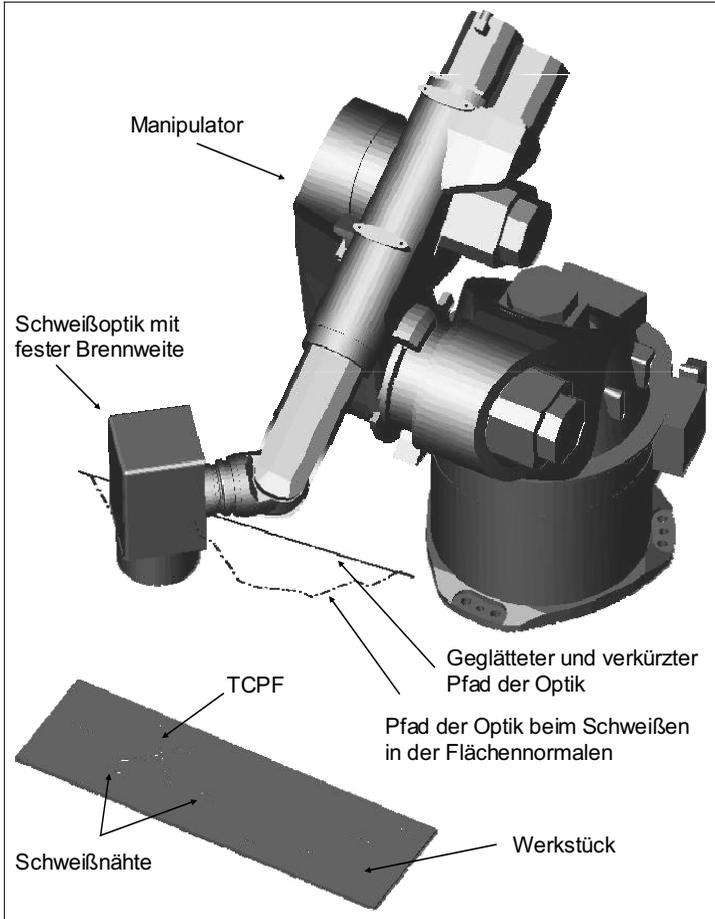


Abbildung 19: Veranschaulichung der Grundidee zur Bestimmung von taktzeit-optimalen Roboterbahnen für das RLS mit Optiken fester Brennweite. Durch Verkürzung und Glättung des Pfades des Optikscherpunktes wird eine hauptachsengestützte Vorpositionierung in Verbindung mit einer schnellen Versatzbewegung durch die Handachsen angestrebt.

Dieser Punkt charakterisiert einerseits die Grobposition der Schweißoptik über dem Bauteil und andererseits den Drehpunkt zur Umpositionierung bei einer Versatzbewegung. Damit stellt dieser Punkt das Bindeglied für die Haupt- und Handachsbelegung für diesen Maschinentyp dar (im Gegensatz zu Anlagen mit Zoomoptiken, vgl. Kapitel 5). Eine Taktzeitverbesserung soll durch eine Verkürzung und Glättung des Pfades der Schweißoptik erreicht werden (siehe Abbildung 19).

4.1.2 Überblick zu den Teilverfahren

Die Planung der Roboterbewegung wird in mehreren Teilschritten vorgenommen, die in der Abbildung 20 dargestellt sind.

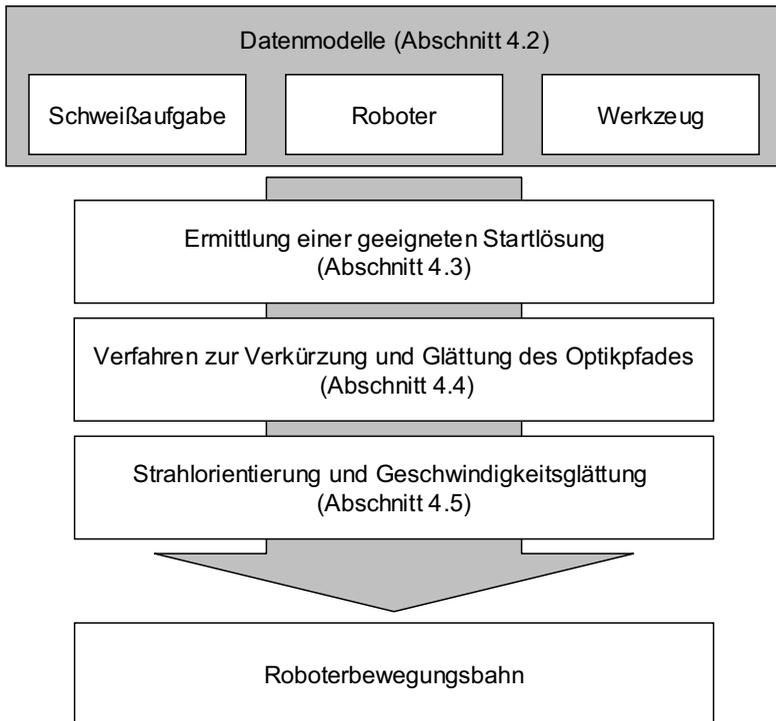


Abbildung 20: Teilschritte zur Optimierung von Roboterbewegungsbahnen für Remote-Anlagen mit Optiken fester Brennweite

Ausgehend von einer Aufgabenbeschreibung sowie von Modellen des Manipulators und des eingesetzten Schweißwerkzeugs, wird zunächst eine Startbewegungsbahn der Schweißoptik ermittelt. Der Fokus dieses Verfahrens liegt auf der Suche von optimalen Schweißreihenfolgen sowie geeigneter Einstrahlwinkel, die eine möglichst kurze Bahn zu erzeugen erlauben. Ein wichtiges Kriterium ist dabei die Gewährleistung der Erreichbarkeit jedes Punktes und die Einhaltung der erlaubten Einstrahlwinkel.

In einem zweiten Schritt wird die gefundene Startlösung weiter verkürzt und geglättet. Durch die Glättung des Optikpfades werden unnötige Drehrichtungsänderungen der Hauptachsen weitestgehend unterdrückt. Nach diesem Optimierungsschritt liegt eine kartesisch glatte Bewegungsbahn der Schweißoptik vor.

Zur weiteren Verbesserung des Bewegungsverhaltens des Manipulators ist es notwendig, Geschwindigkeitssprünge bei der Bewegung der Optik zu vermeiden. Diese würden dazu führen, dass die schnellen Versatzbewegungen durch die langsameren Hauptachsen limitiert werden. Daher wird in einem dritten Optimierungsschritt die Geschwindigkeit der Optikbewegung dadurch geglättet, dass die Pfadstützpunkte in geeigneter Weise zueinander verschoben werden. Dadurch werden Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge reduziert und zusätzlich Schwingungen im Robotersystem durch die Reduktion des Rucks minimiert.

4.2 Datenmodelle

4.2.1 Modell der Schweißaufgabe

Zur Bestimmung von Roboterbewegungen für das RLS ist eine durch Rechnerwerkzeuge verarbeitbare Aufgabenbeschreibung notwendig, die einerseits die geometrischen Daten der Einzelnähte und Prozessparameter umfasst, andererseits gültige Positionierungsabweichungen (vgl. Abschnitt 2.4.2) beschreibt. Damit unterscheidet sich diese Form der Repräsentation grundsätzlich von einem Roboterprogramm, welches lediglich **eine** Lösung für die gegebene Aufgabe abbildet.

Eine Schweißaufgabe besteht aus mehreren Nähten, die ihrerseits mit den Attributen *Vorschubgeschwindigkeit* und *Laserleistung* beaufschlagt werden. Jede Naht wiederum besteht aus mehreren Stützpunkten, die zusätzlich über Orientierungsinformationen verfügen und daher als Frames abgebildet werden. Als Konvention gilt, dass die positive Z-Achse des Frames mit der Flächennormalen am Nahtpunkt zusammenfällt. Die positive X-Achse zeigt in die Schweißrichtung.

Die Y-Achse des Frames ergibt sich durch Bildung des Kreuzprodukts der Z- und der X-Achse. Die geometrische Form der Naht zwischen den Stützpunkten wird durch einfache Verbindungselemente wie Geraden, Kreisbögen oder Splines charakterisiert. Der Ort und die Gestalt einer Naht im Raum können demnach durch die Lage ihrer Stützpunkte beschrieben werden. Im weiteren Verlauf sind diese als Aufgabenframes bezeichnet. Aufgabenframes besitzen die Eigenschaft, dass sie während der Optimierung in ihrer Lage und Orientierung nicht verändert werden, da sie zur Referenzierung der Einstrahlwinkelbereiche dienen. Frei manipulierbar sind hingegen Positionsframes, die sich zum Zeitpunkt der Aufgabendefinition in Deckung mit den Aufgabenframes befinden (vgl. Abbildung 21).

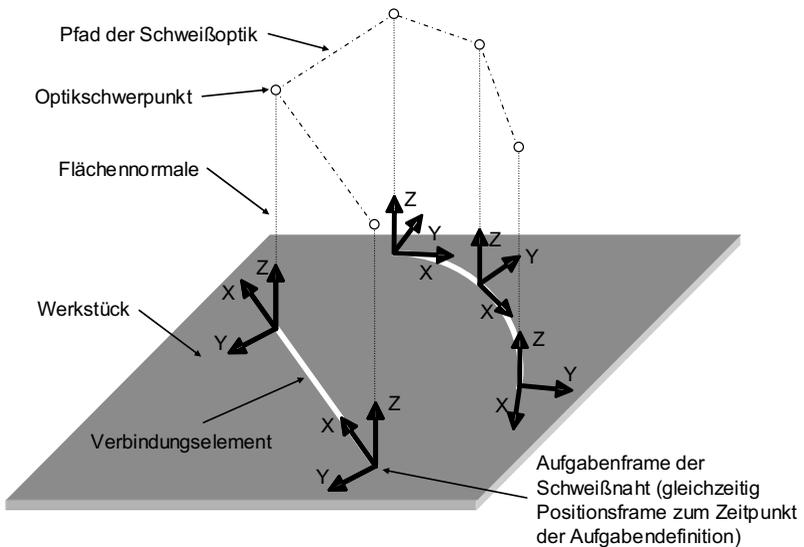


Abbildung 21: Konventionen und Beschreibungsformen zur Aufgabenmodellierung

Zur Darstellung der Prozessfreiheitsgrade werden für jeden Nahtpunkt Einstrahlwinkelbereiche definiert, die für die jeweilige Verbindung eine ausreichende Anbindungsqualität garantieren. Diese Bereiche können geometrisch als *Schweißkegelsegmente* interpretiert werden (siehe Abbildung 22), die datentechnisch durch vier Winkel, jeweils in stechender, schleppender, lateral positiver und lateral negativer Richtung (vgl. Abschnitt 2.4.1) abzubilden sind. Die Winkel werden dabei zur Flächennormalen des Schweißpunktes, also zur Z-Achse des Aufgabenframes angegeben. Die Grenzwinkel legen fest, in wieweit die Positi-

onsframes um die X- bzw. Y-Achse bei der Optimierung gegenüber dem Aufgabenframe verdreht werden dürfen. Da jeder Optikscherpunkt auf dem positiven Z-Vektor des Positionsframes im Abstand der Brennweite liegt, bedeutet eine Verdrehung des Frames eine Umpositionierung der Optik. Die möglichen Aufenthaltsorte der Optik lassen sich geometrisch als sphärische Oberseite eines Kegels repräsentieren (siehe Abbildung 22). Ist für die Schweißaufgabe zusätzlich eine Fokusslagertoleranz aufgrund hoher Tiefenschärfe des Laserstrahls zulässig, stellt sich der Raum gültiger Aufenthaltsorte als Volumen dar. Dieses Attribut wird allerdings nicht in der Aufgabenbeschreibung, sondern im Werkzeugmodell hinterlegt (siehe Abschnitt 4.2.3), da es nur durch die verwendete Anlagentechnik bestimmt wird und aufgabenunabhängig ist.

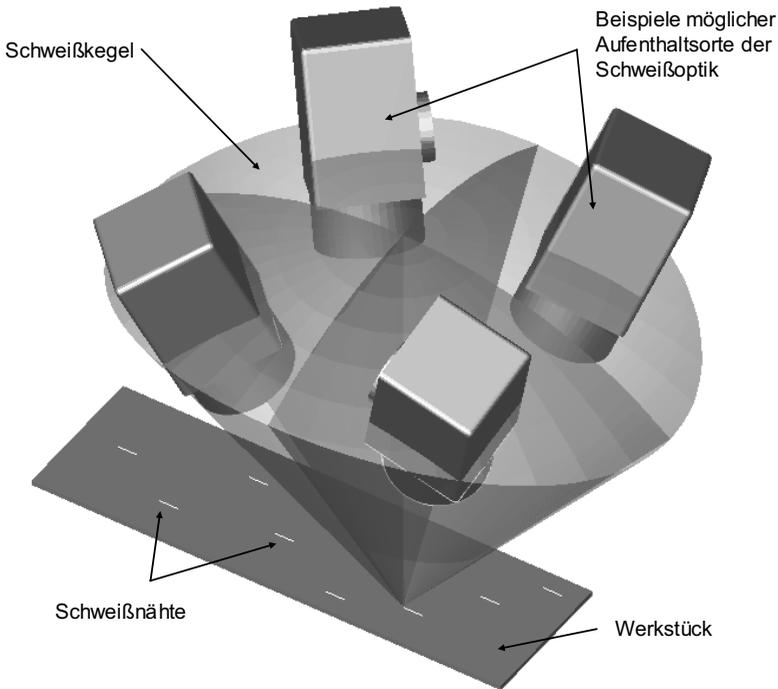


Abbildung 22: Dreidimensionale Darstellung gültiger Einstrahlwinkelbereiche für einen Schweißpunkt. Die Ausrichtung erfolgt anhand des Aufgabenframes. Die sphärische Oberfläche des Schweißkegels repräsentiert den Raum möglicher Aufenthaltsorte des Schweißoptikscherpunkts.

Aus diesen Betrachtungen folgt die Repräsentation einer Schweißaufgabe mit ihrem gültigen Lösungsraum anhand der Datenstruktur in Abbildung 23.

Aufgabe	Naht	Nahtnummer
		Laserleistung
		Vorschubgeschwindigkeit
	Stützpunkte	Punktnummer
		Aufgabenframe
		Verbindungselement
		Stechwinkel
		Schleppwinkel
		Lateralwinkel negativ
		Lateralwinkel positiv

Abbildung 23: Datenmodell einer Schweißaufgabe

4.2.2 Modell des Schweißroboters

Für die Berechnung von Schweißbewegungen ist ein Datenmodell des Roboters notwendig, welches in der Abbildung 24 zu sehen ist. Dieses umfasst zum einen Attribute des Manipulators und zum anderen steuerungstechnische Merkmale der Maschine. Der Manipulator eines Roboters wird durch Attribute zur Beschreibung der kinematischen Kette sowie der Achsantriebe charakterisiert.

Das kinematische Modell eines Manipulators wird zur Bestimmung des Pfades der Schweißoptik benötigt. Anhand des Modells kann bestimmt werden, ob ein Bahnpunkt vom Manipulator erreicht werden kann. Die Beschreibung der Roboterkinematik ist zur rechnerischen Bestimmung des TCP bei vorgegebenen Achswinkeln (Vorwärtstransformation, siehe Abschnitt 3.2.3.2) sowie zur Ermittlung von Achslagen bei vorgegebenem Raumpunkt (Rückwärtstransformation, siehe Abschnitt 3.2.3.3) erforderlich. Entsprechend den Grundlagen in Kapitel 3.1 werden zur Beschreibung der Einzelgelenke Matrizen nach der Denavit-Hartenberg-Notation verwendet. Reale Roboterstrukturen erfordern darüber hinaus Einschränkungen der möglichen Gelenkwinkellagen aufgrund von Eigenkollisionsgefahr. Weiterhin ist die Definition der Drehrichtung, die herstellerepezi-

fisch im mathematisch positiven oder negativen Drehsinn definiert sein kann, notwendig.

Roboter	Manipulator	Kinematik	Achsnummer
			Drehrichtung
			DH-Parameter a
			DH-Parameter α
			DH-Parameter d
			DH-Parameter θ
			Endlage positiv
			Endlage negativ
			Grundstellung
		Antriebe	Geschwindigkeit max.
	Beschleunigung max.		
	Ruck max.		
	Steuerung	Interpolationstakt	
		Schaltsignale	

Abbildung 24: Datenstruktur zur Beschreibung eines Roboters

Bei der Berechnung von Roboterbahnen für das RLS werden zur nahtbezogenen Interpolation die geometrischen Daten der Schweißnaht verwendet. Zur Bewegung zwischen den Nähten werden PTP-Bewegungen definiert, da diese die schnellstmögliche Bewegung zwischen zwei Stützpunkten charakterisieren. Soll nun für eine ermittelte Folge von Naht- und Zwischenbewegungen die dafür notwendige Zeit berechnet werden, ist ein genaues Abbild des steuerungstechnischen Verhaltens des Roboters notwendig. Aus dem Bereich der 3D-Robotersimulationen existieren zur Lösung dieses Problems roboterherstellerspezifische Plug-Ins, die auf dem RRS-Standard (Realistische Roboter-Simulation, siehe dazu auch BERNHARDT et al. 1997a, 1997b) basieren. Dadurch ist es möglich, für gegebene Stützpunkte das genaue Bahn- und Zeitverhalten des Manipulators zu bestimmen. Innerhalb dieser Arbeit wird dieser Weg allerdings nicht beschritten, da die RRS-Module nur die generischen Interpolationsarten abdecken können und lediglich für Sechs-Achs-Roboter ausgelegt sind. Zur Bestimmung einer Roboterbewegung anhand applikationsspezifischer Interpolation sind somit Angaben zu den Antrieben der Einzelachsen notwendig. Die Antriebe werden dabei charakterisiert durch ein intrinsisches Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Ruckvermögen, welche als Randbedingungen an eine PTP-Interpolation zu verstehen sind.

Zu den Attributen des Manipulators sind weitere steuerungstechnische Charakteristika des verwendeten Roboters erforderlich. Die für diese Arbeit notwendigen Informationen umfassen die Interpolationstaktrate sowie die Signale zum Ein- und Ausschalten der Laserleistung.

4.2.3 Werkzeugmodell

Zur vollständigen Abbildung der kinematischen Kette einer roboterbasierten Remote-Anlage ist ein Modell des Werkzeugs notwendig. Im Falle von in diesem Kapitel betrachteten Festoptiken ist die Modellierung äußerst trivial und umfasst lediglich die Transformationsmatrix vom Flansch des Roboters zum Fokus der Laserstrahlung sowie die für den Anlagentyp gültige Fokusbrennweite in Strahlrichtung (Tiefenschärfe, vgl. Abschnitt 2.4.2.2). Die Transformationsmatrix kann nach der Konvention in Abschnitt 3.2.3 auch als 6_7T bezeichnet werden. Daraus ergibt sich die in Abbildung 25 veranschaulichte Datenstruktur des Werkzeugs.

Werkzeug	Transformationsmatrix
	Fokusbrennweite positiv
	Fokusbrennweite negativ

Abbildung 25: Datenstruktur zur Beschreibung einer Schweißoptik mit Fokusbrennweite

4.3 Ermittlung einer geeigneten Startlösung

4.3.1 Allgemeines

Der erste Schritt zur Planung einer zeitoptimalen Roboterbewegung ist die Ermittlung einer geeigneten Startlösung. Anhand dieses initialen Pfades wird die weitere Verbesserung in diesem Kapitel beschrieben.

4.3.2 Problematik bei der Ermittlung einer Startlösung

Die Bahn der Schweißoptik kann zur Vereinfachung durch Stützstellen mit geradlinigen Verbindungselementen charakterisiert werden. Die Stützstellen entsprechen dabei den jeweiligen Optikpositionen am Start- oder Endpunkt eines

Nahtelements. Daher müssen diese Punkte im Abstand der Brennweite von der Nahtstelle entfernt sein. Die möglichen Aufenthaltsorte der Optik werden durch eine sphärische Hüllfläche charakterisiert (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Jede Stützstelle kann unendlich viele Positionen auf der sphärischen Hüllfläche einnehmen und definiert jeweils den Einstrahlwinkel. Für jeden möglichen Einstrahlwinkel existieren bei Verwendung eines rotationssymmetrischen Werkzeugs, wie es beim RLS gegeben ist, zudem unendlich viele mögliche Optikorientierungen, um die Schweißnaht zu treffen. Daraus leiten sich wiederum unendlich viele mögliche Achswinkelstellungen des Manipulators ab.

An eine initiale Lösung des Pfades der Schweißoptik stellen sich somit folgende Anforderungen:

- a) Realisierung einer möglichst kurzen globalen Bewegung der Optik durch die Hauptachsen des Manipulators;
- b) Minimierung der notwendigen Orientierungsänderung der Optik, realisiert zu einem Großteil durch die Roboterhandachsen;

Die Weglänge des Optikpfades kann durch geeignete Auswahl des Einstrahlwinkels an jedem Start- und Endpunkt eines Nahtelements verkürzt werden. Allerdings berücksichtigt diese Betrachtung nicht den Grad der notwendigen Orientierungsänderung, der beim Sprung zwischen zwei Nahtelementen notwendig ist. Der Grad der notwendigen Orientierungsänderung wird hauptsächlich durch den Versatzweg zwischen zwei Nahtelementen und damit durch die Bahn des TCPF bestimmt. Diese wird durch die Verschweißreihenfolge der Aufgabe, die beim RLS im Regelfall aus einer Vielzahl von Steppnähten besteht, definiert. Eine geeignete Startlösung der Optikbahn muss demnach aus einer möglichst kurzen Bahn des TCPF abgeleitet werden.

Entsprechend dieser Vorbetrachtung gliedern sich die Teilschritte zur Bestimmung einer geeigneten Startlösung in:

- a) Bestimmung einer möglichst kurzen TCPF-Bahn;
- b) Überführung der TCPF-Bahn in eine Optikscherpunktsbahn durch Zuweisung von geeigneten Einstrahlwinkeln;

4.3.3 Bestimmung der Bahn des TCPF

4.3.3.1 Einordnung und Komplexität der Fragestellung

Eine Schweißaufgabe kann aufgefasst werden als ein Graph mit Knoten (Nähte) und Kanten (Verbindungsstrecken zwischen den Knoten), für den ein Hamiltonkreis⁸ gefunden werden muss. Ein Spezialfall des Hamiltonkreisproblems ist die Suche nach der insgesamt kürzesten Kantenlänge im Graphen. Diese sehr bekannte Fragestellung wird häufig auch als das *Problem des Handlungsreisenden* (engl.: Travelling-Salesman-Problem (TSP)) bezeichnet, bei dem ein Reisender n Städte auf einer insgesamt möglichst kurzen Reiseroute besuchen möchte. Die Komplexität von Kombinatorikproblemen dieser Art steigt mit der Anzahl der Knoten. Für den Fall von $n=10$ zu bereisenden Städten, die als Punkte aufgefasst werden (symmetrisches TSP), existieren $n!$, also $3 \cdot 10^6$ mögliche Lösungen. Vergrößert wird die Anzahl der Lösung noch weiter, wenn die zu besuchenden Orte nicht als Punkte, sondern als Objekte mit geometrischer Ausdehnung aufgefasst werden müssen (asymmetrisches TSP). Im Falle von Schweißnähten, die beliebig in die eine oder andere Richtung geschweißt werden können, ergibt sich folgende Formel zur Bestimmung der Anzahl möglicher Lösungen L :

$$L = n! \cdot 2^n. \quad (27)$$

Damit existieren für ein Beispiel mit 10 Nähten bereits $3 \cdot 10^9$ Kombinationsmöglichkeiten. Zur Veranschaulichung diene die Abbildung 26, in der die Komplexitätssteigerung durch geometrische Ausdehnung des Zielortes verdeutlicht ist.

Aus diesen Betrachtungen wird klar, dass Travelling-Salesman-Probleme nur für Aufgaben mit wenigen Punkten durch reines Ausprobieren aller möglichen Kombinationen in einer noch sinnvollen Berechnungszeit gelöst werden können. Für komplexere Aufgaben werden heuristische Verfahren angewandt, die eine gute Lösung approximieren, allerdings nicht die beste Lösung garantieren.

Zur heuristischen Lösung des TSP existiert in der Literatur bereits eine Vielzahl an Algorithmen. Einen hervorragenden Überblick zum Thema bieten beispielsweise APPLIGATE et al. (2006). Eingeteilt werden Heuristiken zur Lösung des

⁸ Benannt nach dem irischen Mathematiker Sir William Hamilton. Ein Hamiltonkreis ist ein Kreis, der alle Knoten eines Graphen enthält und keinen Knoten dabei zweimal durchläuft.

TSP in Eröffnungsverfahren und Verbesserungsverfahren. Eröffnungsverfahren generieren eine Tour komplett neu und orientieren sich dabei am menschlichen Vorgehen. Ein sehr bekanntes Verfahren ist die „*Nearest-Neighbor-Heuristik*“, die ausgehend von einem Startpunkt den jeweils nächstgelegenen Ort auswählt. Dieses wird sukzessive fortgesetzt, bis alle Städte bereist wurden und die Tour wieder am Ausgangsort endet. Problematisch bei diesem Verfahren ist, dass bis zum Ende der Abstand zwischen dem Start- und Endpunkt unberücksichtigt bleibt und zudem die Gefahr besteht, in einer „Sackgasse“ zu enden, von der aus wiederum ein weiter Weg bis zum nächsten Punkt zurückgelegt werden muss.

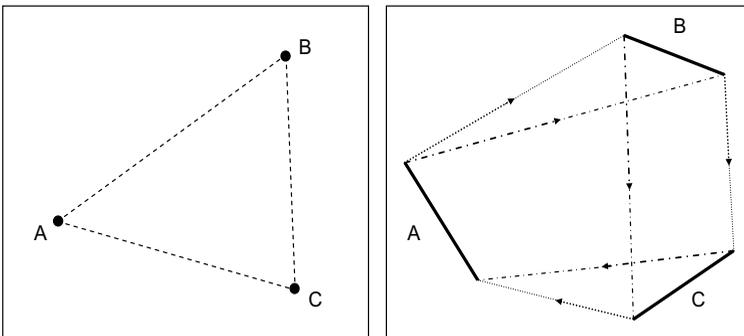


Abbildung 26: Beispiel eines TSP mit drei abzufahrenden Orten. Im linken Beispiel werden die Orte als Punkte interpretiert. Dieser Fall wird auch als symmetrisches TSP bezeichnet. Für dieses Beispiel existieren 6 mögliche Kombinationen. Im rechten Beispiel werden die abzufahrenden Orte als Schweißnähte dargestellt, die beliebig in die eine oder andere Richtung geschweißt werden können. In diesem Fall ergeben sich bereits 48 Kombinationsmöglichkeiten. Er wird als asymmetrisches TSP bezeichnet.

Besser geeignet sind Verfahren, die eine bestehende Tour sukzessive verbessern. Zu den wichtigsten Algorithmen dieser Klasse gehören die *k*-Opt-Heuristiken. Bei diesen Verfahren werden *k* Kanten aus einer gegebenen Tour entfernt und gegen *k* andere Kanten ausgetauscht, so dass wieder eine geschlossene Tour erzeugt wird. Ist die neue Tour kürzer als die alte, wird sie als neue Lösung verwendet. Der bekannteste Algorithmus dieser Klasse ist die Lin-Kernighan-Heuristik (siehe LIN & KERNIGHAN 1970), mit der im Jahre 2004 nachweislich die kürzeste Verbindung aller 24978 schwedischen Städte ermittelt werden konnte.

4.3.3.2 Methodik zur Approximation des kürzesten TCPF-Pfades

Innerhalb dieser Arbeit werden k-Opt-Algorithmen aus der Klasse der Verbesserungsheuristiken hinsichtlich der speziellen Anforderungen beim RLS adaptiert. Die entwickelte Methodik ist in Abbildung 27 zu sehen.

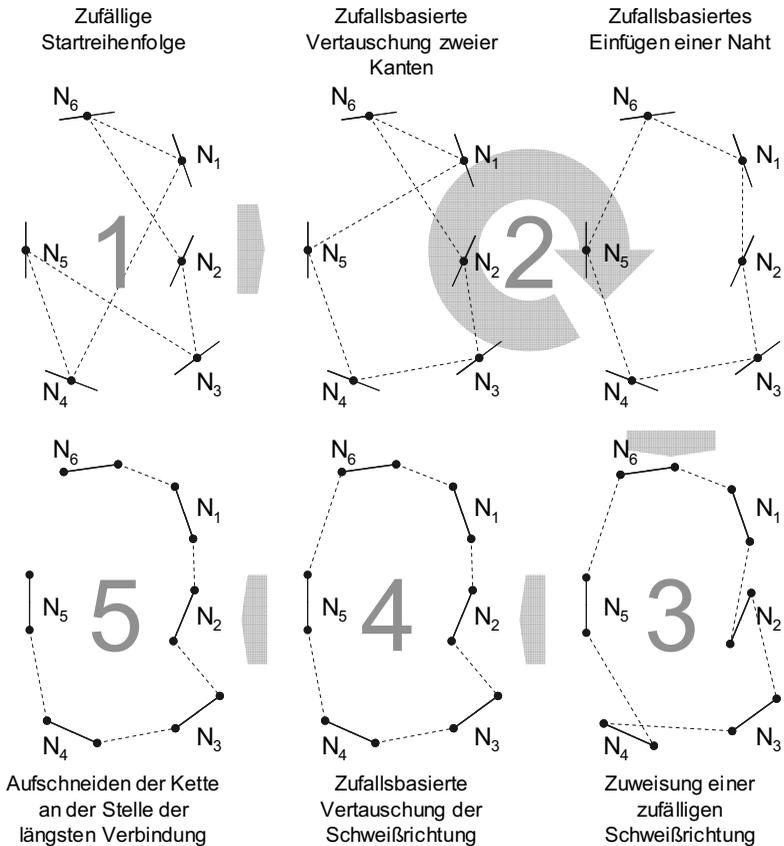


Abbildung 27: Methodik zur Berechnung einer möglichst kurzen Bahn des TCPF für eine Schweißaufgabe

Dabei werden folgende fünf Hauptschritte durchlaufen:

- 1. Schritt: Die Algorithmen der k-Opt-Klasse sind spezifiziert für symmetrische TSP und erfordern daher Orte ohne geometrische Ausdehnung. Da die Länge von Schweißnähten im Regelfall relativ klein gegenüber den Versatzlängen ist, können sie für die ersten Berechnungsschritte als Punkte abstrahiert werden. Diese werden durch die Bestimmung des geometrischen Mittelpunkts des Nahtelements anhand des Modells der Schweißaufgabe (siehe Abschnitt 4.2.1) gebildet. Zur Erzeugung einer Startreihenfolge wird jedem Nahtelement eine Position zufällig zugewiesen. Dadurch entsteht ein Hamiltonkreis, der als Startlösung für die weiteren Berechnungen dient.
- 2. Schritt: Zur Verbesserung der Reihenfolge werden in diesem Schritt zwei Unterverfahren der k-Opt-Algorithmen eingesetzt. Beim ersten Verfahren werden zwei beliebige Kanten ausgewählt und gegeneinander vertauscht. Ergibt die Vertauschung eine kürzere Gesamtverbindung als die Ausgangslösung, so wird die neue Reihenfolge beibehalten. Beim zweiten Verfahren wird ein zufällig gewählter Punkt an einer anderen, zufällig gewählten Stelle im Hamiltonkreis eingefügt. Auch hier wird die neue Lösung bei einer Verbesserung beibehalten, ansonsten wieder verworfen. Die beiden Verfahrensschritte werden abwechselnd so lange durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Dieses kann beispielsweise durch eine vorgegebene Anzahl an Iterationen abgebildet werden. Durch die abwechselnde Ausführung beider Verbesserungsmethoden wird die Gefahr, an ein lokales Optimum zu approximieren, vermindert.
- 3. Schritt: Bei der bisherigen Berechnung wurde die geometrische Ausdehnung der Nahtelemente vernachlässigt. Um eine Gesamtreihenfolge zu erhalten, die die Schweißrichtung berücksichtigt, werden in diesem Schritt die Nähte als Elemente mit zwei Stützpunkten definiert. Den beiden Punkten wird jeweils zufällig das Attribut *Startpunkt* oder *Endpunkt* zugewiesen. Dadurch ergibt sich ein erweiterter Hamiltonkreis, der die gefundene globale Reihenfolge beibehält und zudem mit einer Schweißrichtungsinformation ausgestattet ist.
- 4. Schritt: Die im 3. Schritt zufällig generierten Schweißrichtungen sind mitunter nicht optimal. Daher wird in diesem Schritt die iterative Vertauschung der Schweißrichtung für ein zufällig ausgewähltes Nahtelement

vorgenommen. Die Festlegung einer Lösung erfolgt dabei analog zum 2. Schritt.

- 5. Schritt: Der im 4. Schritt erzeugte Hamiltonkreis stellt eine Tour durch alle Schweißelemente dar und endet wieder am Startpunkt. Für eine reale Schweißung ist allerdings der Rückweg vom letzten Nahtelement wieder zurück in die Ausgangsposition zeitlich relativ unkritisch, da diese Verfahrensbewegung synchron mit dem Ein- und Ausschleusen eines neuen Bauteils durchgeführt werden kann. Daher bietet es sich an, die beiden Nähte als Start- und Endnaht zu definieren, die insgesamt die längste Verbindungslinie aufweisen. Dazu wird eine einfache Suche im Hamiltonkreis durchgeführt.

4.3.3.3 Leistungsfähigkeit des Verfahrens

In diesem Abschnitt wird die Untersuchung des entwickelten Verfahrens beschrieben. Für eine Bewertung ist es sinnvoll, zunächst die Leistungsfähigkeit der Teilschritte zu analysieren, bei denen die Nähte als Punkte abstrahiert werden (siehe Abschnitt 4.3.3.2, 1. und 2. Schritt).

Abbildung 28 zeigt sehr deutlich die Effizienz des Verfahrens. Bereits nach 400 Suchläufen wurde für das gezeigte Beispiel eine Gesamtlänge ermittelt, die 36% der Länge der initialen Lösung entspricht. Das Endergebnis nach 2000 Suchläufen beträgt 31% des Wertes der Startlösung.

Interessant wäre es nun zu wissen, wie gut die Heuristik an das globale Optimum approximiert. Dies ist keine einfache Fragestellung, da ein Vergleich die Kenntnis des tatsächlichen globalen Optimums voraussetzt. Dieses kann allerdings nur durch Ausprobieren aller existierenden Kombinationsmöglichkeiten ermittelt werden. Die Berechnungszeit steigt dabei überproportional mit der Anzahl der betrachteten Punkte.

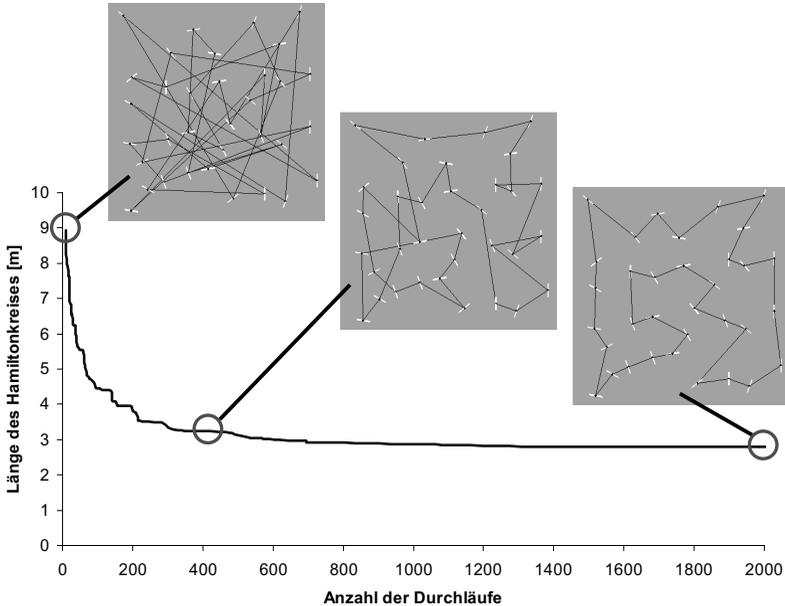


Abbildung 28: Reduktion der Gesamtlänge des Hamiltonkreises in Abhängigkeit der Zahl der Suchläufe des Verfahrens für ein Schweißbeispiel mit 34 Schweißnähten. Die drei Bilder zeigen eine zufällig gewählte Startreihenfolge (links), die gefundene Reihenfolge nach 400 Durchläufen (Mitte) und nach 2000 Durchläufen (rechts). Die Berechnungszeit bis zum Abbruch bei 2000 Iterationen betrug dabei 4,5 s.

Eine Versuchsreihe, deren Ergebnisse Abbildung 29 zu entnehmen sind, kann daher nur relativ kleine Beispiele betrachten. Aus den Ergebnissen dieser Versuchsreihe wird deutlich, dass die verwendeten k-Opt-Algorithmen mindestens ein sehr gutes Ergebnis eines möglichst kurzen Hamiltonkreises durch alle als Punkte abstrahierten Nähte liefern können. Aufgrund der Kopplung des Abbruchkriteriums an die Anzahl der Nahtelemente steigt die Berechnungszeit lediglich linear mit der Anzahl der betrachteten Punkte.

⁹ Die Algorithmen wurden in Matlab® implementiert und auf einem PC mittlerer Leistung ausgeführt (Intel® Xeon® Prozessor, CPU Takt 2,8 GHz, Arbeitsspeicher 2 GBytes). Matlab ist eine Hochsprache für technische Berechnungen und für die Algorithmenentwicklung, siehe: <http://www.mathworks.de>.

Anzahl der Nähte	Anzahl möglicher Kombinationen	Ermittelte Gesamtlänge durch Ausprobieren aller Lösungen [mm]	Berechnungszeit beim Ausprobieren aller Lösungen [s]	Ermittelte Gesamtlänge durch Verwendung des k-Opt-Verfahrens [mm]	Berechnungszeit bei Verwendung des k-Opt-Verfahrens [s]	Abweichung [%]
5	120	899,3	0,02	899,3	0,62	0,00
6	720	1117,6	0,04	1117,6	0,81	0,00
7	5040	1142,7	0,12	1142,7	0,88	0,00
8	40320	1152,8	0,7	1152,8	1	0,00
9	362880	1199,8	5,35	1199,8	1,2	0,00
10	3628800	1375,9	48,03	1375,9	1,32	0,00
11	39916800	1499,5	497,49	1499,5	1,49	0,00
12	479001600	1600,2	5459,8	1600,2	1,65	0,00

Abbildung 29: Vergleichende Untersuchung zur Bestimmung der Güte der k-Opt-Heuristik (Nähte als Punkte abstrahiert)

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Leistungsfähigkeit des Gesamtverfahrens untersucht. Dabei wird, ähnlich zum vorherigen Versuch, eine Gegenüberstellung der approximierten Lösung und des durch Ausprobieren aller Kombinationsmöglichkeiten ermittelten globalen Optimums vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigt tabellarisch die Abbildung 30.

Anzahl der Nähte	Anzahl möglicher Kombinationen	Ermittelte Gesamtlänge durch Ausprobieren aller Lösungen [mm]	Berechnungszeit beim Ausprobieren aller Lösungen [s]	Ermittelte Gesamtlänge durch Verwendung des entwickelten Verfahrens [mm]	Berechnungszeit bei Verwendung des entwickelten Verfahrens [s]	Abweichung [%]
4	384	953,9	5,20	954,2	0,54	0,03
5	3840	970,4	18,00	970,6	0,67	0,02
6	46080	1206,0	147,55	1297,6	0,82	7,60
7	645120	1258,7	1032,30	1296,6	1,29	3,01
8	10321920	1283,3	19481,80	1366,1	1,52	6,45

Abbildung 30: Vergleichende Untersuchung zur Bestimmung der Güte des Gesamtverfahrens

Die Ergebnisse zeigen, dass die Annahme, die Schweißnähte zunächst als Punkte zu abstrahieren, einen Fehler bei der Ermittlung der Gesamtlänge durch die Heuristik verursacht. Trotzdem ist dieser, zumindest für die betrachteten Beispiele, relativ klein, so dass das gezeigte Verfahren eine durchaus gute Lösung ermitteln kann.

4.3.4 Zuweisung der Einstrahlwinkel

4.3.4.1 Vorüberlegung

Der zweite Schritt zur Bestimmung einer günstigen Startlösung ist die Übertragung des TCPF-Pfades in die gesuchte Optikbahn. Wie bereits erläutert, wird die Bahn der Optik durch Stützpunkte definiert, die den jeweiligen Start- und Endpunkten der Nahtelemente zugeordnet werden können. Die Ermittlung der genauen Lage der Stützpunkte geschieht durch Zuweisung geeigneter Einstrahlwinkel, die durch die Lage des Frames im Nahtpunkt definiert werden. Die Stützpunkte ergeben sich durch einfache Multiplikation des Einheitsvektors der Z-Achse mit der Länge der Brennweite.

Eine einfache Methode wäre nun, den Vektor der Flächennormalen, also den Z-Vektor des im Aufgabenmodell hinterlegten Frames (siehe Abschnitt 4.2.1), als Einstrahlwinkel zu verwenden. Allerdings ist nicht bekannt, ob diese Position für den Manipulator tatsächlich erreichbar ist. Daher ist ein Verfahren notwendig, mit welchem die Optikpositionen auf ihre Gültigkeit hin überprüft werden kann.

4.3.4.2 Prinzip des Verfahrens

Zur Lösung dieser Fragestellung wurde ein Verfahren entwickelt, welches in der Abbildung 31 schematisch gezeigt wird. Es verwendet als Ausgangsdatensatz die Frames aus der Aufgabenbeschreibung. Für jeden Schweißkegel werden, durch Kippen und Verdrehen des zugeordneten Frames im Nahtstützpunkt, Punktmuster auf der sphärischen Oberfläche des Schweißkegels erzeugt (siehe Abbildung 32, links). Die Verkippung wird dabei durch die in der Aufgabenbeschreibung definierten Grenzwinkel der Einstrahlung limitiert. Für jede ermittelte Position erfolgt in einem weiteren Schritt die Überprüfung ihrer Gültigkeit.

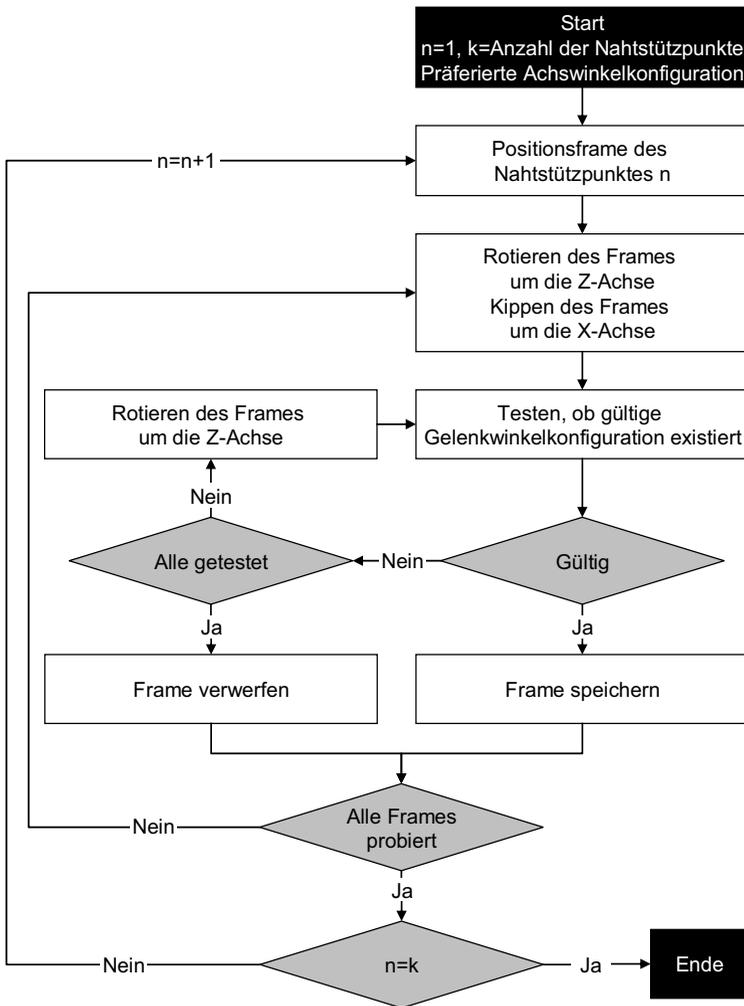


Abbildung 31: Verfahren zur Ermittlung aller gültigen Frames für alle Stützpunkte der Nahtelemente

Gültig ist eine Position prinzipiell dann, wenn mindestens ein Satz gültiger Gelenkwinkel des Manipulators existiert. Wie in Abschnitt 3.2.3.3 dargelegt wurde, existieren im Regelfall mehrere Konfigurationen für einen Raumpunkt. In der Praxis sind jedoch, aufgrund von Kollisionen mit Objekten im Arbeitsraum, nicht alle Konfigurationen auch tatsächlich einstellbar. Daher werden Gelenkwinkel

nur dann als gültig klassifiziert, wenn sie einer vorgegebenen Konfiguration entsprechen.

Zur Bestimmung der Erreichbarkeit ist die Kenntnis der inversen Kinematik (siehe Abschnitt 3.2.3) für das jeweilige Frame erforderlich. Da es sich beim RLS mit Festoptiken um eine Maschinenstruktur mit lediglich sechs Freiheitsgraden handelt, ist eine analytische Lösung des Problems möglich und hinsichtlich der Berechnungszeit sinnvoll. Die implementierte Funktion zur Bestimmung der inversen Kinematik basiert im Wesentlichen auf geometrischen Betrachtungen in Anlehnung an die Methode nach Lloyd und Hayward (vgl. Abschnitt 3.2.3.3.2). Da es sich dabei lediglich um die Anwendung von Standardverfahren handelt, wird an dieser Stelle nicht näher auf diese Funktion eingegangen.

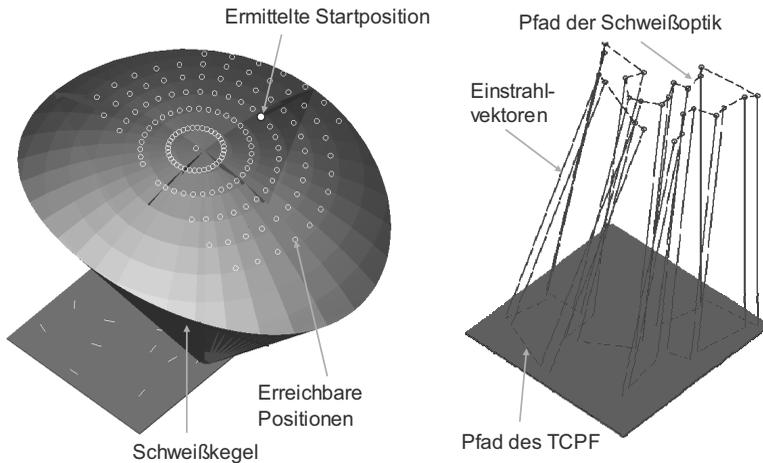


Abbildung 32: Ermittlung gültiger Einstrahlwinkel zur Generierung des initialen Optikpfades. Für jeden Schweißkegel werden Punktmuster generiert, die auf ihre Erreichbarkeit hin überprüft werden. Im linken Bild sind gültige Positionen der Schweißoptik als Kreise markiert. Daraus wird eine als Startposition der Optik bestimmt (ausgefüllter Kreis). Durch das Verbinden aller derart bestimmten Punkte in der durch die TCPF-Bahn vorgegebenen Reihenfolge ist die Startlösung der Optikscherpunktsbahn definiert (rechts).

Mit dem entwickelten Verfahren kann durch diskrete Abtastung der Kugeloberfläche der Bereich der anfahrbaren Optikpositionen ermittelt werden. Die Gesamtheit dieser Punkte beschreibt einen Teilbereich der Kegeloberfläche. Durch ein einfaches Mittelwertverfahren wird derjenige Punkt ausgewählt, der dem Zentrum der Fläche am nächsten kommt. Für den ermittelten Punkt wird eine zufällige Orientierung um die Z-Achse des Frames gewählt, welches für den Manipulator anfahrbar ist.

Die initiale Bahn des Optikscherpunktes bildet sich damit durch das Verbinden aller ermittelten Punkte. Die Verbindungsreihenfolge entspricht dabei derjenigen, die durch die TCPF-Bahn vorgegeben ist. Wie in der Abbildung 32 (rechts) zu sehen ist, liefert das entwickelte Verfahren eine Startlösung der Schweißoptikbahn, die für jedes Nahtelement gültige Einstrahlwinkel und erreichbare Posen garantiert. Durch die Berücksichtigung der Versatzwege der TCPF-Bahn und deren Übertragung auf die Optikbewegung kann ein Pfad ermittelt werden, der zwar nach diesem Teilverfahren noch einen relativ kantigen Verlauf aufweist, dafür aber bereits die globale Topologie der Schweißaufgabe in die Planung mit einbezieht. Die weitere Glättung des Optikpfades behandelt der nächste Abschnitt.

4.4 Verfahren zur Verkürzung und Glättung des Optikpfades

4.4.1 Allgemeines

Das Ergebnis der Startlösungsbestimmung aus Abschnitt 4.3 liefert eine voroptimierte Optikbahn, die sich allerdings aufgrund des kantigen Verlaufs negativ auf die Bewegung des Roboters auswirkt. Scharfe Kanten und häufige Richtungswechsel verursachen an der Führungsmaschine störende Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge. Diese bewirken nicht nur eine Verlängerung der Taktzeit, sondern oftmals auch eine Drehrichtungsumkehr der Hauptachsen, durch die Nahtfehler aufgrund von Getriebeispiel hervorgerufen werden. Es ist demnach notwendig, den Bewegungsverlauf der Optik zu glätten.

Die Verbesserung des Optikpfades geschieht innerhalb von zwei Teilschritten. Im ersten Schritt wird eine allgemeine Verkürzung der Bahn angestrebt. Im zweiten Schritt erfolgt eine Glättung der verkürzten Bahn.

4.4.2 Verkürzung des Optikpfades

4.4.2.1 Beurteilung des bisherigen Ergebnisses

Die Bahn der Optik bestimmt zum einen die Positionierung des Werkzeugs über dem Bauteil durch die Roboterhauptachsen und zum anderen die Orientierung, die durch die Handachsen eingestellt werden muss, um den Schweißpunkt zu treffen. Die langsamere dieser beiden Teilbewegungen bestimmt die notwendige Versatzzeit. Betrachtet seien zwei Extremfälle:

- Extremfall 1: Alle Nähte können von einer Position der Optik aus geschweißt werden. Der Optikpfad reduziert sich zu einem Punkt. Die notwendigen Schweiß- und Versatzbewegungen ergeben sich somit nur durch eine Umorientierung des Werkzeugs. Die Taktzeit hängt in diesem Fall davon ab, wie schnell die Roboterhandachsen die Orientierungen einstellen können.
- Extremfall 2: Alle Nähte werden in der Flächennormalen geschweißt. Für ein flaches Bauteil bildet sich dabei die TCP-Bahn als Optikschwerpunktsbahn ab. In diesem Fall ist keine Orientierungsänderung notwendig, da die Schweiß- und Versatzbewegungen lediglich durch eine Positionsänderung des Werkzeugs bewirkt werden. Die Taktzeit hängt in diesem Fall davon ab, wie schnell die Roboterhauptachsen die Lageänderungen einstellen können.

Die beiden Extremfälle zeigen, dass ein Pfad der Optik gefunden werden muss, der beide Anteile der Versatzbewegung, nämlich die Hand- und die Hauptachsenbewegung, sinnvoll miteinander kombiniert. Dies bedeutet, dass die Positionierungsbewegung der Optik durch die Hauptachsen möglichst in Richtung des nächsten Versatzes vorgenommen werden sollte. Dadurch wird die notwendige Umorientierung beim Versatz verkleinert und die Handachsenbewegung wesentlich unterstützt. Um dies zu erreichen, ist ein Verfahren erforderlich, welches im nachfolgenden Abschnitt erläutert wird.

4.4.2.2 Prinzip des Verfahrens

Die Grundidee des Verfahrens ist es, die initiale Startlösung aus den Verfahrensschritten in Abschnitt 4.3 durch kleine Änderungen einzelner Stützpunkte dergestalt zu modifizieren, dass der globale Bewegungspfad über dem Bauteil zwar

beibehalten wird, dieser sich aber lokal verkürzt. Dies wird durch iterative Verschiebungen der Stützpunkte erreicht, wobei der erste und der letzte Stützpunkt des Pfades nicht verändert werden darf. Dadurch wird verhindert, dass sich die Optikscherpunktsbahn zu sehr verkürzt (Extremfall 1). Die Verschiebung der Stützpunkte ergibt sich dabei, analog zu Abschnitt 4.3.4, durch Verdrehung und Verkipfung des Positionframes an jedem Nahtstützpunkt. Der prinzipielle Ablauf des Verfahrens zeigt schematisch die Abbildung 33.

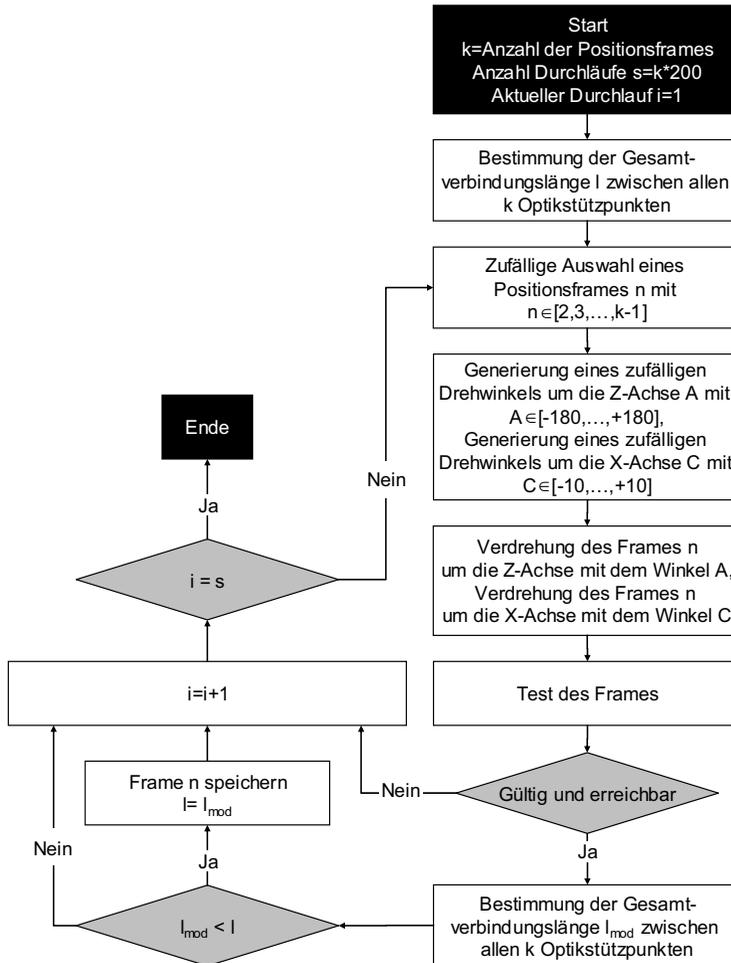


Abbildung 33: Verfahren zur iterativen Verkürzung der Optikscherpunktsbahn

Als Eingangsdaten für die Berechnung dienen die modifizierten Positionsframes aus dem Teilverfahren in Abschnitt 4.3. Da das Verfahren auf eine iterative Verbesserung abzielt, wird ein Abbruchkriterium benötigt, welches die Suchläufe in Abhängigkeit der Anzahl der vorhandenen Stützpunkte steuert. Als zufrieden stellend erwies sich, die Anzahl der Durchläufe auf ein 200-faches der Stützpunktzahl einzustellen.

Zu Beginn des Verfahrens wird die kartesische Gesamtverbindungslänge zwischen allen Pfadstützpunkten berechnet. Zufallsgesteuert wird ein beliebiges Nahtframe ausgewählt, um die Z- und anschließend um die X-Achse gedreht. Die Werte der Drehwinkel werden ebenfalls zufallsgesteuert aus einem vorgegebenen Wertebereich festgelegt. Der Wertebereich für die Verdrehung um die Z-Achse wird auf ± 180 Grad eingestellt. Damit ist es möglich, die Optikposition durch die anschließende X-Achsenrotation in alle möglichen Richtungen zu verschieben. Als Wertebereich für die Verkippung um die X-Achse erwies sich ± 10 Grad als guter Wert, der einerseits zu große Sprünge verhindert und andererseits die Anzahl der notwendigen Iterationen minimiert und somit die Rechenzeit verkürzt.

Es ist nun notwendig, ein modifiziertes Frame dahingehend zu prüfen, ob es in der neuen Lage noch gültig ist. Dazu müssen folgende Randbedingungen erfüllt sein:

- Ein gültiges Frame muss vom Roboter angefahren werden können.
- Ein Frame darf die vorgegebenen Einstrahlwinkelbeschränkungen nicht verletzen.

Durch die zufallsbasierte Verschiebung eines gültigen Stützpunktes des Optikpfades ergibt sich eine modifizierte Bahn. Für diese wird die neue Gesamtlänge ermittelt und mit der Startlänge verglichen. Ist der neue Pfad besser, d.h. kürzer, wird das modifizierte Frame beibehalten, ansonsten wieder verworfen. Diese iterative Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist.

Die Wirkungsweise des Verfahrens wird in Abbildung 34 für ein Schweißbeispiel mit 34 Nahtelementen verdeutlicht. Ausgehend von der relativ unstrukturierten Verteilung der Optikstützpunkte (Abbildung 34, links), die im Teilverfahren zur Bestimmung einer Startlösung (Abschnitt 4.3) generiert wurden, bildet sich ein geglätteter Pfad aus (siehe Abbildung 34, Mitte). Das Endergebnis der iterativen Verbesserung (siehe Abbildung 34, rechts) ist ein Optikpfad, der im

Vergleich zur Startlösung wesentlich strukturierter und kürzer ist. Dabei folgt der Pfad grob der Bewegungsrichtung des TCP und unterstützt somit die Versatzbewegung. Allerdings weist die Bewegungsbahn aufgrund der zufallsbedingten Zuweisung von Optikpositionen noch lokale Deformationen auf, die zu einer unruhigen Bewegung des Manipulators führen würden.

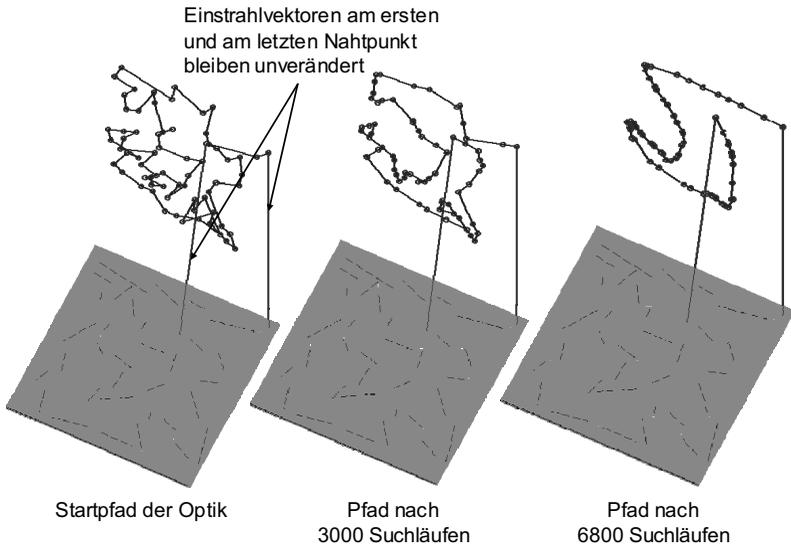


Abbildung 34: Wirkungsweise des Teilverfahrens zur Verkürzung des Optikpfades

4.4.3 Glättung des Optikpfades

4.4.3.1 Beurteilung des bisherigen Ergebnisses

Die Stützpunkte der im vorangegangenen Teilverfahren erzeugten Optikbahn weisen durch die Ausnutzung der aufgabenspezifischen Freiheitsgrade der variablen Einstrahlwinkel bereits einen hohen Ordnungsgrad auf. Trotzdem ist die Bahn nicht zwangsläufig optimal. Die Gründe hierfür sind folgende Aspekte:

- Die Punkte wurden im vorangegangenen Verfahren durch stochastische Einstrahlwinkelzuordnungen lediglich grob definiert. Daher können Punkte an einzelnen Stellen häufiger auftreten als an anderen (siehe Ab-

bildung 34, unten). Für ein Abfahren der Bahn bedeutet dies ein ungleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil der Optikbewegung.

- Je nach eingestelltem Einstrahlwinkel besitzen die einzelnen Stützpunkte aufgrund der fest vorgegebenen Brennweite unterschiedliche Höhenniveaus bezüglich der Bauteilebene. Beim Abfahren der Bahn würde somit der Manipulator die Optik in ihrer Höhenlage stetig verändern, was zu einer längeren Taktzeit führt.

Die weitere Verbesserung des Optikpfades erfordert also ein Verfahren, welches einerseits die Stützpunkte zueinander und in Bezug auf ihr Höhenniveau ausnivelliert und andererseits die Punkte gleichmäßig auf dem Pfad verteilt. Zur Glättung des Pfades kann, neben den variablen Einstrahlwinkeln, der Tiefenschärfebereich des Laserstrahls verwendet werden. Dieser Freiheitsgrad wurde bislang bei der Optimierung noch nicht berücksichtigt. Sein Wertebereich ist im Modell des Schweißwerkzeugs hinterlegt (vgl. Abschnitt 4.2.3).

4.4.3.2 Prinzip des Verfahrens

Die Grundidee zur Verbesserung des Optikpfades liegt in dem Ansatz, die einzelnen Stützpunkte gedanklich mit der Metapher eines „Gummibandes“ zu verbinden. Wird ein Punkt losgelassen, bewirken Kräfte eine kleine Verschiebung. Die Verschiebung wird dabei durch die Limitierung der Einstrahlwinkel sowie vom eingestellten Tiefenschärfebereich begrenzt. Dieses Prinzip ist in Abbildung 35 anhand einer Draufsicht auf eine Schweißaufgabe schematisch veranschaulicht.

Dem Verfahren liegt eine iterative Vorgehensweise zu Grunde, bei der Stützpunkte zufallsbasiert ausgewählt und verschoben werden. Dabei werden, analog zum vorangegangenen Teilverfahren, die globalen Start- und Endpunkte des Optikpfades nicht verschoben (P_1 und P_6 in Abbildung 35), da ansonsten das „Gummiband“ in sich zusammenfallen würde. Interpretiert bedeutet dies, dass sich die Optikbahn, soweit es die Einstrahlwinkeln Grenzen zulassen, verkürzt und im Extremfall zu einem Punkt reduziert. Die damit einhergehende Problematik wurde bereits in Abschnitt 4.4.2.1 diskutiert.

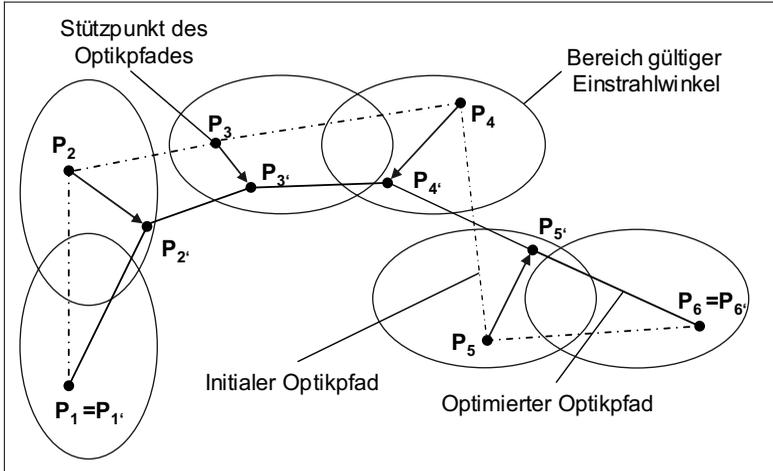


Abbildung 35: Iterativen Glättung der Optikbahn mit dem Prinzip des „Gummibandes“

Der Ausgangspunkt für die Berechnung einer Verschiebung eines Punktes auf dem „Gummiband“ ist die Definition von zwei Kräften, die jeweils in Richtung der Nachbarnpunkte für einen beliebig gewählten Stützpunkt wirken. Der Betrag jeder einzelnen Kraft F_f könnte im einfachsten Fall nach dem Hooke'schen Gesetz

$$F_f = D_f * \Delta l \quad (28)$$

berechnet werden. Dabei ist D_f die Federkonstante und Δl der Abstand zwischen dem zu verschiebenden Punkt und dem entsprechenden Nachbarn. Durch Vektoraddition können daraus die Verschieberichtung und die Länge der Verschiebung bestimmt werden.

Der Ansatz erfordert allerdings relativ viele Iterationen, um die Bahn zu glätten. Dies zeigt sich hauptsächlich bei Stellen auf der Optikbahn, an denen durch das zufallsbasierte Verfahren aus Abschnitt 4.4.2 viele Bahnstützpunkte beieinander liegen und weit auseinander gezogen werden müssen. Dies ist im lediglich linearen Zusammenhang zwischen der Kraft und der Auslenkung in Formel (28) begründet. Deutlich effizienter ist das Verfahren, wenn der Einfluss des Abstandes Δl als quadratisch angesetzt wird. Damit verändert sich Formel (28) zu

$$F_f = D_f * \Delta l^2. \quad (29)$$

Für jeden verschobenen Stützpunkt werden korrespondierende Frames ermittelt. Deren Z-Vektor ergibt sich durch die Verbindung des Nahtpunktes mit dem modifizierten Optikstützpunkt. Die Y- und X-Achsenrichtungen werden vom Ursprungsframe übernommen. Für diese Frames gilt, ebenso wie für die anderen bisher betrachteten Teilverfahren, dass sie die maximalen Einstrahlwinkel nicht verletzen dürfen und vom Manipulator angefahren werden können.

Die Glättungswirkung des Verfahrens veranschaulicht Abbildung 36.

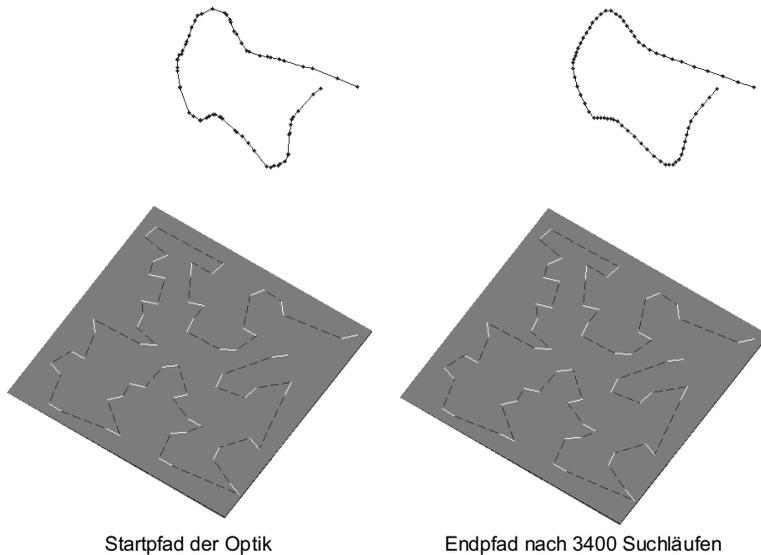


Abbildung 36: Wirkungsweise des Teilverfahrens zur Glättung des Optikpfades anhand eines Beispiels mit 34 Schweißnähten

4.5 Strahlorientierung und Geschwindigkeitsglättung

4.5.1 Bestimmung der Optikorientierung um die Strahlachse

4.5.1.1 Beurteilung des bisherigen Ergebnisses

Ein Bewegungspfad der Optik, der mit Hilfe der Teilverfahren aus den Abschnitten 4.3 und 4.4 ermittelt wurde, weist folgende Eigenschaften auf:

- Der Pfad ist an eine kurze TCP-Bewegung gekoppelt und berücksichtigt somit die Topologie der Schweißaufgabe.
- Die geglättete Bahn unterstützt durch geeignete Vorpositionierung der Optik über dem Bauteil die Versatzbewegung.
- Jeder Stützpunkt liegt innerhalb der Erreichbarkeit des Manipulators.
- Jeder Stützpunkt liegt innerhalb der vorgegebenen Einstrahlwinkel- und Tiefenschärfebegrenzung.

Bei den bisherigen Verfahrensschritten wurde die Orientierung der Optik um die Strahlachse vernachlässigt. Es wurde lediglich geprüft, ob für einen ermittelten Einstrahlwinkel mindestens eine gültige Orientierung existiert. Die Auswahl der Orientierungen entscheidet allerdings maßgeblich über die notwendige Taktzeit zum Durchfahren des Optikpfades. Dies wird deutlich, wenn man sich die möglichen Roboterposen für einen gegebenen Einstrahlwinkel vor Augen führt (siehe Abbildung 37).

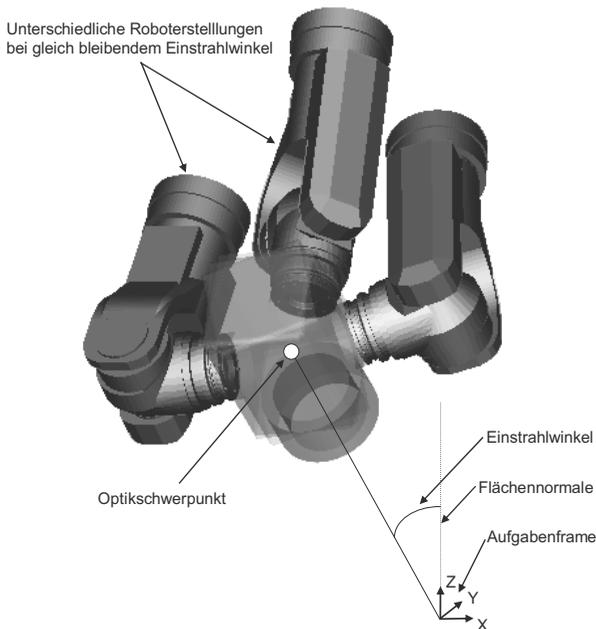


Abbildung 37: Roboterposen unter Beibehaltung des Einstrahlwinkels

Es ist daher notwendig, für einen Stützpunkt eine solche Orientierung auszuwählen, die im Vergleich zum vorangegangenen Stützpunkt eine möglichst kleine Achswinkeländerung erfordert.

4.5.1.2 Prinzip des Verfahrens

Zur Lösung dieses Problems wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Abbildung 38 schematisch zeigt. Als Eingangsdaten dienen die Positionsframes aus den vorangegangenen Optimierungsschritten sowie die vorgegebene Robotergrundstellung, die im Robotermodell hinterlegt ist. Diese gilt als Referenz für die Bestimmung der Orientierung des ersten Stützpunktes. Dadurch wird erreicht, dass die Roboterkinematik beim Anfahren des ersten Stützpunktes eine Pose einnimmt, die derjenigen in der Grundstellung möglichst ähnlich ist. Dadurch wird verhindert, dass durch einen Konfigurationswechsel (siehe Abschnitt 3.2.3) die empfindliche Lichtleitfaser an der Optik beschädigt wird.

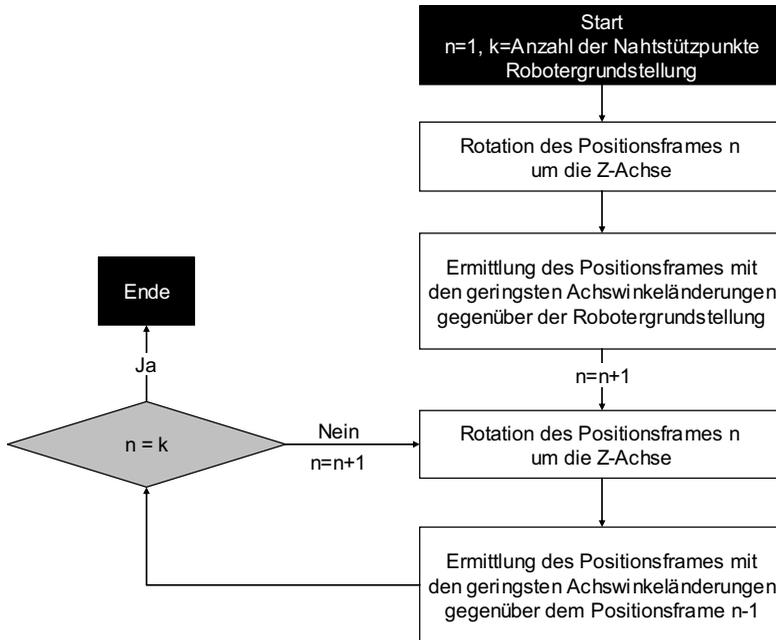


Abbildung 38: Verfahren zur Bestimmung der Orientierung der Optik in Strahlrichtung

Ein Positionsframe wird um die Strahlrichtungsachse, also um die Z-Achse, gedreht. Dabei wird untersucht, für welchen Drehwinkel die kleinste Achswinkeländerung im Vergleich zur vorhergehenden Pose auftritt. Das ermittelte Frame wird gespeichert und dient als Referenz für die Ermittlung des nachfolgenden Frames. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis alle Positionsframes behandelt sind. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann eine Optikbewegung erreicht werden, die dem geglätteten Verlauf folgt und zudem die dafür notwendigen Achswinkeländerungen gering hält.

4.5.2 Anpassung der Optikgeschwindigkeit

4.5.2.1 Beurteilung des bisherigen Bahnverlaufs

Die bisherige Glättung der Optikbahn unter Hinzunahme kleinster Achswinkeländerungen bewirkt eine Roboterbewegung, die die Optik global über dem Bauteil positioniert und dadurch die Versatzbewegung unterstützt.

Analysiert man die sich ergebenden Achswinkelgeschwindigkeiten für die ermittelte Bahn, so ist festzustellen, dass die Hauptachsen teilweise unverhältnismäßig hohe Geschwindigkeiten bei Versatzbewegungen, also bei der Umpositionierung des Brennflecks von einer Schweißnaht zur nächsten, realisieren müssen. Dies ist sehr deutlich am Geschwindigkeitsverlauf der Roboterachsen 2 und 3 in dem in der Abbildung 40 (S. 84) gezeigten Beispiel zu erkennen.

Da Versatzbewegungen durch achssynchrone PTP-Interpolation realisiert werden, bestimmt die langsamste Achse beim Versatz die notwendige Zeit für alle anderen Achsen. Da die leichteren Roboterhandachsen in der Regel wesentlich schneller beschleunigen können, kann eine weitere Verbesserung der Taktzeit dadurch erzielt werden, dass die Geschwindigkeitssprünge der Hauptachsen reduziert werden. Die schnelleren Handachsen übernehmen dabei einen größeren Anteil an der notwendigen Versatzbewegung.

4.5.2.2 Prinzip des Verfahrens

Eine Reduktion der Geschwindigkeitssprünge in den Hauptachsen kann dadurch erreicht werden, dass diese bereits bei der Schweißbewegung mit einer höheren Geschwindigkeit beaufschlagt werden. Da sich die Schweißgeschwindigkeit allerdings nicht ändern darf, bedeutet diese Vorgehensweise im kartesischen Raum

eine weitere Vorpositionierung der Schweißoptik über dem Bauteil hin zum nächsten Stützpunkt. Dadurch ist die notwendige Gelenkwinkeländerung der Handachsen größer, wodurch deren Versatzgeschwindigkeit erhöht wird. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 39 an einem Beispiel verdeutlicht.

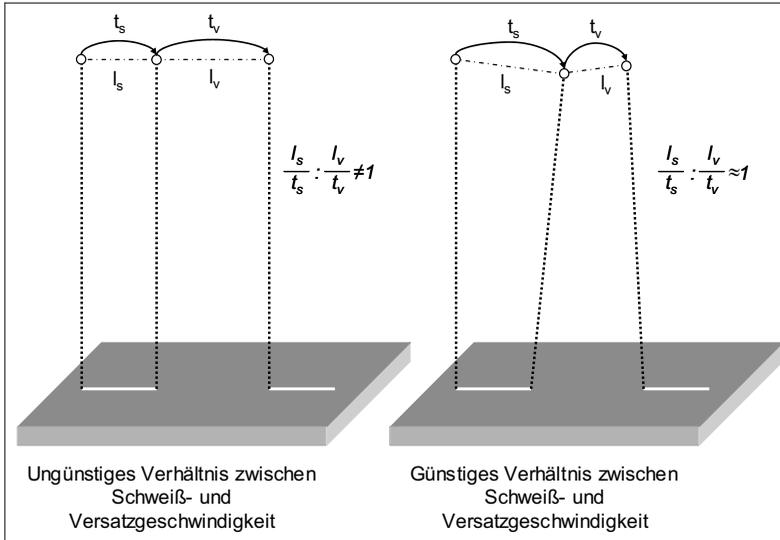


Abbildung 39: Geschwindigkeit des Werkzeugs über dem Bauteil bei einer Schweiß- und bei einer Versatzbewegung. Ein ungünstiges Verhältnis (links) resultiert in einem hohen Geschwindigkeitssprung der Hauptachsen. Durch geeignete Anpassung der Stützpunkte (rechts) kann eine gleichmäßigere Verteilung erreicht werden.

Die Geschwindigkeit der Optik über dem Bauteil bei einer Schweißung mit v_s bzw. bei einem Versatz mit v_v kann nach

$$v_s = \frac{l_s}{t_s} \text{ bzw. } v_v = \frac{l_v}{t_v} \quad (30)$$

berechnet werden, wobei t_s und t_v die Schweiß- bzw. die Versatzzeit charakterisieren. Ergibt das Verhältnis der Geschwindigkeiten einen Wert von ungleich 1, so ist beim Übergang zwischen der Schweißung und dem Versatz ein Geschwindigkeitssprung der Optik über dem Bauteil notwendig. Das Ziel einer Verbesserung des Geschwindigkeitsverlaufs muss es demnach sein, die Optikstützpunkte derart zu verschieben, dass gilt:

$$\frac{l_s}{t_s} \cdot \frac{l_v}{t_v} \approx 1 \quad (31)$$

Die einzige Unveränderliche in Gleichung (31) ist die Schweißzeit t_s . Bei einer Verschiebung eines Optikstützpunktes verändern sich nicht nur die beiden kartesischen Verbindungslängen l_s und l_v , sondern auch die gelenkwinkelspezifische Versatzzeit t_v . Zudem beeinflusst eine Verschiebung eines Optikpunktes auch wiederum die benachbarten Schweiß- und Versatzlängen. Daher ist eine direkte Lösung von Gleichung (31) nicht möglich. Vielmehr ist ein Verfahren erforderlich, welches durch kleine lokale Änderungen von einzelnen Optikpositionen eine gute Gesamtlösung für alle Schweiß-Versatz-Paare der Aufgabe ermittelt.

Dazu wurde eine iterative Berechnungsmethodik entwickelt, die analog zur Gummiband-Metapher aus Abschnitt 4.4.3 kleine Versatzbewegungen der Optikstützpunkte durch eingeprägte Kräfte bewirkt. Dabei wird wiederum der erste und letzte Punkt der Optik nicht verändert. Durch Berechnung des Verhältnisses in Formel (31) für einen beliebig gewählten Punkt kann ermittelt werden, ob die Kraft zum vorherigen oder zum nachfolgenden Nachbarpunkt wirken muss. Der Betrag der Kraft lässt sich aus der Abweichung des Verhältnisses zum Zielwert 1 ableiten. Die Wirkungsweise des Verfahrens kann anhand eines in der Abbildung 40 gezeigten Beispiels verdeutlicht werden. Beobachtet man die Geschwindigkeitsverläufe der Hauptachsen A1 bis A3, so ist festzustellen, dass deren Geschwindigkeit bei einer Schweißbewegung (Bereiche mit glattem Geschwindigkeitsverlauf) höher ist als ohne das vorgestellte Verfahren. Die notwendigen Geschwindigkeitssprünge bei den Versatzbewegungen sind daher deutlich niedriger. Kompensiert wird diese Anpassung durch die Roboterhandachsen A4 bis A6. Hier sind die Amplituden der Geschwindigkeit wesentlich höher. Da die Handachsen schneller beschleunigen können als die Hauptachsen, resultiert aus dieser Berechnungsmethodik eine Verkürzung der Taktzeit. Bei dem gezeigten Beispiel beträgt diese 120 ms.

Es verbleibt die Frage, warum das Verfahren die Geschwindigkeitsverläufe der Hauptachsen nicht vollkommen glättet und weiterhin Beschleunigungsvorgänge notwendig sind. Dies lässt sich damit beantworten, dass mit dem Verfahren lediglich die Positionierungsgeschwindigkeit der Optik geglättet wurde, die maßgeblich durch die Hauptachsen bestimmt wird. Die Hauptachsen übernehmen aber zudem einen Teil der Orientierungsänderung (bestimmt durch den kinematischen Aufbau des Systems Roboter-Festoptik), die mit diesem Verfahren nicht geglättet werden kann.

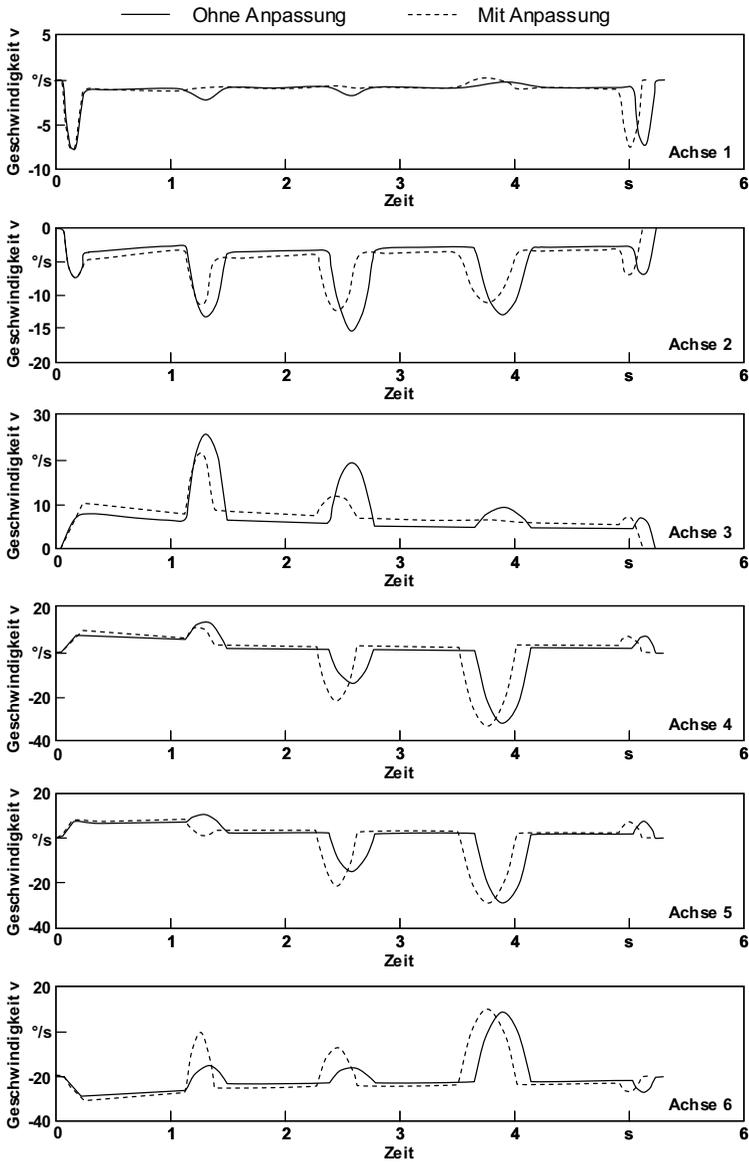


Abbildung 40: Geschwindigkeitsverlauf der Roboterachsen für ein Schweißbeispiel mit 4 Nähten mit und ohne Anpassung der Optikgeschwindigkeiten

4.6 Leistungsfähigkeit der Algorithmen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungsmethoden zur Taktzeitverbesserung beim RLS mit Festoptiken verfolgen das Ziel, durch Ausnutzung der aufgabenspezifischen Redundanz und Berücksichtigung der Aufgabentopologie einen hinsichtlich Bahn- und Geschwindigkeitsverlauf geglätteten Pfad des Optikscherpunktes zu ermitteln. Interessant ist nun, inwieweit diese Vorgehensweise auch tatsächlich eine Taktzeitverbesserung bewirkt.

Es wurden diesbezüglich Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse für zwei Beispiele werden in der Abbildung 41 aufgeführt.

	Beispiel mit 12 Schweißnähten			Beispiel mit 34 Schweißnähten		
	Startlösung (vgl. Abschnitt 4.3)	Bahnglättung (vgl. Abschnitt 4.4)	Geschwindigkeitsanpassung (vgl. Abschnitt 4.5)	Startlösung (vgl. Abschnitt 4.3)	Bahnglättung (vgl. Abschnitt 4.4)	Geschwindigkeitsanpassung (vgl. Abschnitt 4.5)
Optikbrennweite [mm]	882,00			882,00		
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	5,00			5,00		
Gesamte Schweißnahtlänge [mm]	360,00			1020,00		
Gesamter Versatzweg (bezogen auf TCP) [mm]	1252,30			2303,50		
Gesamte Schweißzeit [s]	4,28			12,03		
Gesamte Versatzzeit [s]	5,08	3,46	3,12	11,30	8,89	8,59
Durchschnittliche Versatzgeschwindigkeit [m/min]	14,76	21,66	24,08	12,22	15,54	16,08
Durchschnittliche Zeit pro Nahteinheit (Naht+Versatz) [ms]	780	645	617	793	711	701
Gesamte Taktzeit [s]	9,4	7,7	7,4	23,3	20,9	20,6
Taktzeitreduktion bezogen auf die Startlösung [%]	0,0	17,3	20,9	0,0	10,3	11,6

Abbildung 41: Leistungsfähigkeit der entwickelten Teilverfahren; die verwendeten Schweißmuster sind in Abbildung 32 (12 Nähte) und in Abbildung 36 (34 Nähte) visualisiert.

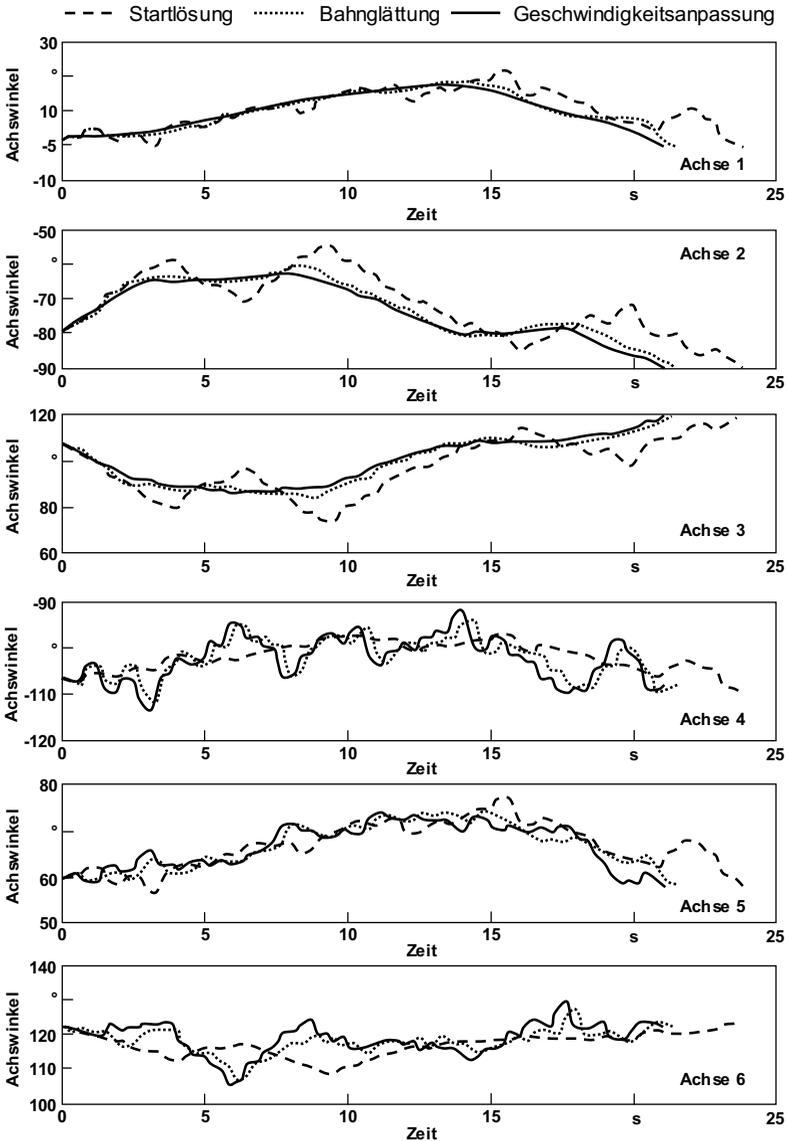


Abbildung 42: Verläufe aller Roboterachswinkel für ein Beispiel mit 34 Schweißnähten (siehe Abbildung 41) nach der Anwendung des jeweiligen Optimierungsschrittes

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits die Startlösungsberechnung eine gute Roboterbahn erzeugt (Verhältnis der Schweißzeit zur Versatzzeit ca. 1). Die bedeutendste Taktzeitverbesserung wird durch die Glättung der Optikbahn bewirkt. Diese beträgt bei den gezeigten Beispielen bis zu 17% gegenüber der Startlösung. Die Anpassung der Optikgeschwindigkeit erzeugt einen zusätzlichen, allerdings relativ kleinen Einspareffekt. Für die gezeigten Beispiele kann somit nachgewiesen werden, dass tatsächlich eine Verbesserungswirkung durch den Einsatz der verwendeten Methodik möglich ist.

Es bleibt an dieser Stelle die Frage offen, inwieweit sich die berechnete Taktzeit von derjenigen unterscheidet, die durch manuelle Programmierverfahren erzielt werden kann. Dieser Aspekt wird im Kapitel 6 anhand industrieller Beispielanwendungen detaillierter betrachtet. Zunächst jedoch gilt es, in Kapitel 5 die Besonderheiten der Bahnplanung bei der Verwendung von Optikwerkzeugen mit einem zusätzlichen Freiheitsgrad zur Strahlpositionierung zu beleuchten.

5 Bahnplanungsalgorithmen für Anlagenkonzepte mit Zoomoptiken

5.1 Übertragbarkeit der Algorithmen

Im Kapitel 4 wurden Algorithmen vorgestellt, mit denen Roboterbewegungen für Remote-Anlagenkonzepte mit Festoptiken hinsichtlich der notwendigen Taktzeit optimiert werden können. Dies geschieht durch die Auswahl einer geeigneten Bewegungsbahn des Optikscherpunktes innerhalb der Freiheitsgrade des Systems Maschine-Schweißprozess. Die Berechnungen erzeugen geglättete Bewegungsbahnen der Optik unter Berücksichtigung der Schweißnahtanordnung auf dem Bauteil und entlasten die langsamere Roboterhauptachsbewegung durch Übertragung eines größeren Anteils der Versatzbewegung auf die schnelleren Handachsen. Das Ergebnis dieser Verschiebung ist die Reduktion der Taktzeit durch die Beschleunigung der einzelnen Versatzbewegungen. Die Glättung der Bahn wird dabei zum einen durch die Modifikation der Einstrahlwinkel, zum anderen durch Ausnutzung des Tiefenschärfebereichs der Laserstrahlung erreicht. Letztere ist jedoch limitiert auf wenige Zentimeter, wodurch lediglich kleinere Höhenanpassungen der Optik möglich sind (siehe Abschnitt 4.4.3).

Bei Anlagenkonzepten mit Zoomoptiken, wie sie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wurden, kann die Lage der fokussierten Strahlung entlang der Strahlachse verschoben werden. Damit fällt die Wirklinie dieses Maschinenfreiheitsgrades mit der des Tiefenschärfebereichs zusammen. Das Werkzeugmodell muss somit gegenüber der Festoptikmodellierung um den einstellbaren Zoombereich sowie die notwendigen Antriebsinformationen erweitert werden (siehe Abbildung 43).

Werkzeug	Allgemeine Attribute	Transformationsmatrix
		Zoombereich maximal
		Zoombereich minimal
	Antrieb	Geschwindigkeit max.
		Beschleunigung max.
		Ruck max.

Abbildung 43: Datenstruktur zur Beschreibung einer Laserschweißoptik mit zusätzlichem Freiheitsgrad zur Fokuspositionierung in Strahlrichtung

Es stellt sich nun die Frage, ob die bereits entwickelten Algorithmen aus Kapitel 4 auch für Anlagenkonzepte mit Zoomoptiken eingesetzt werden können. Dazu müsste lediglich der Zoombereich an die Stelle des Tiefenschärfebereichs bei der Bahnglättungsberechnung treten. Versuche mit diesem Ansatz zeigen, dass die Algorithmen prinzipiell für Anlagenkonzepte mit Zoomoptiken eingesetzt werden können. Durch die Erweiterung des Toleranzbereichs zur Fokuslagenpositionierung können kleinere Einspareffekte bezüglich der Taktzeit erzielt werden (siehe auch Abbildung 49, S. 99). Dies resultiert daraus, dass Höhenunterschiede der Nahtlagen auf dem Bauteil innerhalb der Optikbahn (siehe Abschnitt 4.4) effektiver geglättet werden können.

Trotz dieser positiven Ergebnisse ist die einfache Übertragung der Algorithmen für Festoptikanlagen auf Konzepte mit Zoomoptiken noch unbefriedigend. Ein großes Potential zur Taktzeitreduktion, welches durch Ausnutzung der redundanten Maschinenkinematik bei derartigen Anlagenkonzepten ausgeschöpft werden kann, bleibt durch diesen einfachen Ansatz ungenutzt. Es bedarf somit eines angepassten Optimierungskonzepts.

5.2 Konzept der Optimierung

5.2.1 Optimierungsansatz

Bei der Optimierung von Festoptikanlagen wurde der Optikscharfepunkt als Gegenstand der Bahnplanung ausgewählt, da dieser für dieses Maschinenkonzept am ehesten zur Beschreibung der Grobpositionierung durch die Hauptachsen und der Feinpositionierung durch die Handachsen der Roboterkinematik geeignet ist. Trotzdem kann eine vollständige Entkopplung der beiden Achsbereiche für die jeweilige Positionierungsaufgabe nicht erreicht werden. Es ist aufgrund der kinematischen Anordnung der Maschinenachsen auch immer ein Anteil der Hauptachsbewegung zur Umorientierung der Optik notwendig, da ansonsten aufgrund des eingeschränkten Tiefenschärfebereichs die Naht nicht mehr im Fokus der Laserstrahlung getroffen werden kann.

Anders stellt sich die Situation bei Anlagenkonzepten mit Zoomoptiken dar. Durch den relativ großen Bereich der Fokuslagenverstellmöglichkeit in Strahlrichtung von mehreren Dezimetern kann eine vollständige Entkopplung der Achsbereiche erreicht werden. Der Punkt, der die exakte Schnittstelle zwischen Grob- und Feinpositionierung darstellt, liegt im Handwurzelgelenk der Roboterki-

nematik. Gedanklich lässt sich somit die Roboterstruktur zerlegen in zwei Teileinheiten:

- **Hauptachseinheit:** Die Achsen 1 bis 3 des Sechs-Achs-Knickarm-Roboters stellen die Einheit zur globalen Positionierung des Handwurzelpunkts über dem Bauteil dar. Sie übernehmen darüber hinaus keinerlei Funktionalitäten zur Orientierungsänderung der Optik.
- **Handachseinheit:** Die Achsen 4, 5 und 6 sowie die externe Achse 7 zur Fokuslageneinstellung bilden eine Einheit, deren Bezugskordinatensystem im Handwurzelpunkt liegt. Durch die Achsen 5 und 6 kann die Einstrahlrichtung durch Orientierungsänderung der Optik eingestellt werden. Die Achse 7 stellt den entsprechenden Abstand zum Nahtpunkt ein. Die Achse 4 könnte die Orientierungsänderung der Achsen 5 und 6 unterstützen. Allerdings ist sie für den Prozess des Remote-Laserstrahlschweißens nicht notwendig, da das Werkzeug rotationssymmetrisch ist und ein Nahtpunkt auch bei feststehender Achse 4 innerhalb des gültigen Einstrahlwinkelbereichs getroffen werden kann. Daher wird diese Achse bei der Bewegungsplanung immer mit dem Wert 0 belegt. Durch diese Vorgehensweise vereinfacht sich die redundante Kinematik wieder zu einer analytisch berechenbaren Struktur. Zusätzlich von Vorteil ist, dass dadurch auch konventionelle Robotersteuerungen die Interpolationsberechnung durchführen können.

5.2.2 Überblick zu den Teilverfahren

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, kann die kinematische Kette von Zoomoptikschweißanlagen in zwei Teilbereiche aufgeteilt werden. Zur Bewegungsplanung und zur Optimierung der Taktzeit bietet es sich für diese Maschinenkonzepte an, die Bahn des Handwurzelpunktes zu optimieren. Dabei wird in dieser Arbeit wiederum der Ansatz verfolgt, diese Bahn mit der Topologie der Schweißaufgabe zu koppeln (Reihenfolgeoptimierung der Nahtelemente) und anschließend möglichst zu verkürzen und zu glätten. Die einzelnen Teilverfahren, die zur Optimierung von Remote-Anlagen mit Zoomoptiken notwendig sind, zeigt die Abbildung 44.

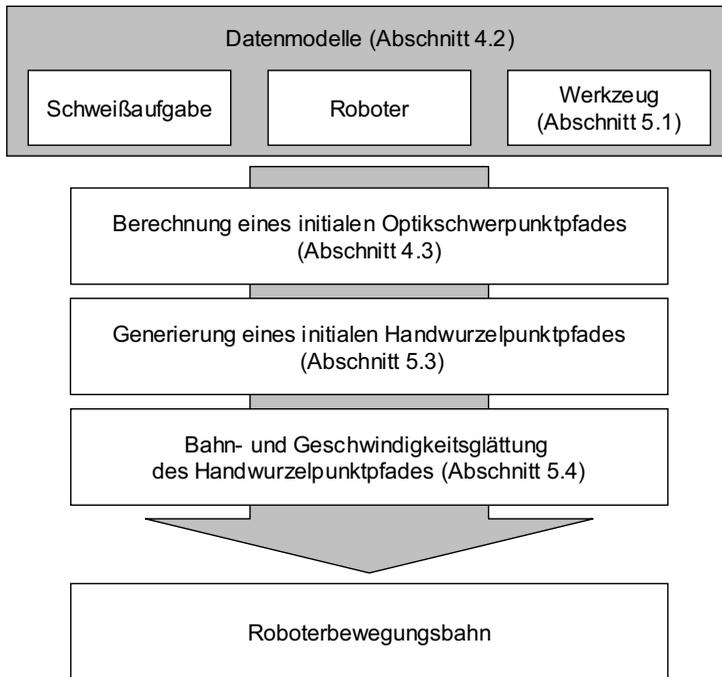


Abbildung 44: Teilschritte zur Optimierung von Roboterbewegungsbahnen für Remote-Anlagen mit Zoomoptiken

Die Eingangsinformationen bestehen bei diesem Optimierungsansatz wiederum aus Datenmodellen zur Beschreibung der Schweißaufgabe und des Roboters, deren Ausprägungen im Abschnitt 4.2 erläutert wurden. Die Modellierung des Schweißwerkzeuges, welches in diesem Fall über eine zusätzliche Antriebseinheit zur Einstellung der Brennweite verfügt, wurde bereits im Abschnitt 5.1 beschrieben.

Die Voraussetzung zur Berechnungen des Handwurzelpunktpfades ist die Kenntnis der Bewegungsbahn des Optikscherpunktes, wie sie mit dem bereits bekannten Verfahren aus dem Abschnitt 4.3 bestimmt werden kann. Anhand dieser Bewegung kann eine initiale Bahn des Handwurzelpunktes abgeleitet werden, die ihrerseits die Reihenfolge der Schweißung sowie die gültigen Einstrahlwinkelbereiche berücksichtigt. Die initiale Lösung beinhaltet im Regelfall eine unregelmäßige Verteilung der Stützpunkte. Daher ist ein Verfahren notwendig, welches die Handwurzelbahn glättet und Geschwindigkeitssprünge bei der Bewegung der

Optik ausgleichen kann. Die einzelnen Teilverfahren werden in den nachfolgenden Abschnitten detailliert beleuchtet.

5.3 Generierung eines initialen Handwurzelpunktpfades

Die Optimierung der Handwurzelpunktbahn beginnt mit der Ermittlung einer initialen Optikscherpunktsbahn, wie sie bereits im Abschnitt 4.3 dieser Arbeit vorgestellt wurde. Das bekannte Resultat dieser Berechnung ist ein Optikpfad, der die Topologie der Schweißaufgabe berücksichtigt und sich aus geeigneten Stützpunkten innerhalb der erlaubten Einstrahlwinkelbereiche zusammensetzt. Da bis zu diesem Zeitpunkt der Bahnberechnung die Tiefenschärfe, bzw. die Einstellbarkeit der Fokusslage, noch nicht berücksichtigt wird, kann die gefundene Lösung zur direkten Generierung der Handwurzelbahn eingesetzt werden.

Es wurde bereits in Abschnitt 4.5 gezeigt, dass für eine gegebene Einstrahlrichtung unendlich viele Roboterposen erzeugt werden können, indem der Handwurzelpunkt der Roboterkinematik auf einer Kreisbahn um die Strahlachse bewegt wird (siehe dazu auch Abbildung 37, S. 79). Für die Bestimmung einer geeigneten Handwurzelpunktlage wurde bereits in Abschnitt 4.5 ein entsprechendes Verfahren gezeigt. Dieses ist allerdings für die Bahnplanung von Anlagen mit Zoomoptiken nicht geeignet, da es davon ausgeht, dass die Achse 4 bewegt werden kann und somit Achswinkellagen von ungleich 0 liefert.

Es ist daher notwendig, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Handwurzelpunkte so auswählt, dass die Winkellage der Achse 4 in jedem Bahnpunkt genau 0 Grad beträgt. Allerdings gibt es im Regelfall keine derartige Lösung für einen gegebenen, festen Optikscherpunkt. Es kann nur dann eine Lösung ermittelt werden, wenn sich der Optikscherpunkt an eine andere Stelle bewegen darf. Diese Verschiebung würde sich aber nur durch eine partielle Rückwärtstransformation der Achsen 5 bis 7 errechnen lassen, für die die Kenntnis des Handwurzelpunktes notwendig ist.

Zur Lösung dieses Problems kommt ein zweistufiges Verfahren zum Einsatz, welches schematisch in Abbildung 45 gezeigt wird. Dabei wird zunächst eine Ebene definiert, die durch die Z-Achse des Roboterkoordinatensystems und den Optikscherpunkt aufgespannt wird. Der korrespondierende Handwurzelpunkt für einen Optikscherpunkt ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Ebene mit dem Kreis möglicher Aufenthaltsorte der Handwurzel (siehe Abbildung 46). Da immer zwei Schnittpunkte existieren, wird derjenige ausgewählt, der näher am Ro-

boterkoordinatensystem liegt. Würde man nun für die Roboterstruktur die notwendigen Achswinkel berechnen, die notwendig sind, den Handwurzelpunkt und den Optikscherpunkt zu treffen, so ergibt sich für die Achse 4 ein Wert von ungleich 0.

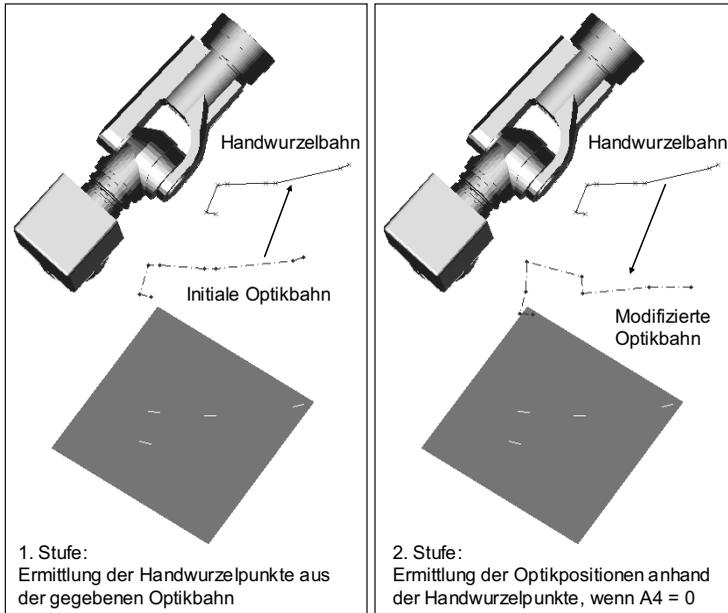


Abbildung 45: Zweistufiges Verfahren zur Ermittlung einer initialen Handwurzelpunktbahn

Daher ist in einem zweiten Schritt die Anpassung der Optikposition notwendig. Dazu werden zunächst durch Rückwärtstransformation für die Hauptachseinheit die Winkel für A_1 bis A_3 berechnet, die notwendig sind, um den Handwurzelpunkt zu treffen. Der Wert für A_4 wird mit 0 Grad belegt. Durch Einsetzen der ermittelten Werte in die Formel (17) (S. 34) kann somit zusätzlich zur Lageinformation die Orientierung der Roboterkinematik im Handwurzelpunkt 4_0T bestimmt werden.

Da nun 4_0T bekannt ist, lässt sich sehr leicht durch geometrische Überlegungen ermitteln, welche Werte für die Achsen 5 bis 7 eingestellt werden müssen, um den vorgegebenen Nahtpunkt zu treffen. Daraus ist der sich ergebende neue Optikscherpunkt bestimmbar.

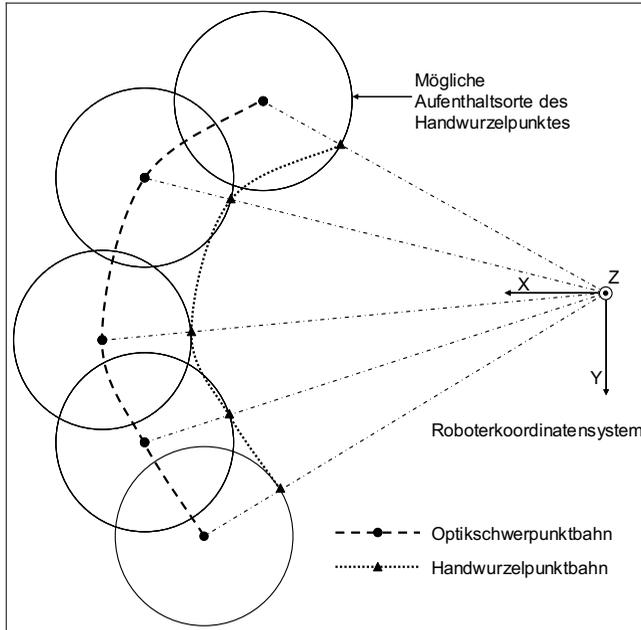


Abbildung 46: Prinzip zur Ermittlung einer initialen Handwurzelpunktbahn für die gegebenen Optikscherpunkte

5.4 Bahn- und Geschwindigkeitsglättung des Handwurzelpunktpfades

Analog zur Optimierung von Festoptikanlagen liegt nach der Ermittlung einer initialen Roboterbahn ein sehr kantiger und unruhiger Verlauf des Handwurzelpunktpfades vor. Besser geeignet ist ein geglätteter Verlauf, da sich dadurch zum einen eine schnellere Positionierbewegung der Optik in Richtung des nächsten Schweißpunktes realisieren, zum anderen die Häufigkeit der Hauptachsreversierung vermindern lässt.

Zur Glättung des Handwurzelpunktpfades wurde ein iteratives Verfahren entwickelt, welches wiederum die Metapher des virtuellen Gummibandes (siehe Abschnitt 4.4.3) aufgreift. Dabei werden nunmehr die Handwurzelpunkte und nicht mehr die Optikscherpunkte mit Kräften beaufschlagt. Die Berechnung der wirkenden Kräfte orientiert sich an Formel (29). Analog zum Glättungsverfahren für den Optikpfad werden der erste und der letzte Bahnpunkt nicht verschoben. Alle

anderen Punkte werden durch iterative, zufallsbasierte Auswahl manipuliert, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

Die Kräfte verursachen kleine Verschiebungen des Handwurzelpunktes, für den die notwendigen Achswinkel berechnet werden können. Dabei wird wiederum die Achse 4 mit dem Wert 0 Grad vorbelegt. Anhand der ermittelten Achslagen lassen sich die neue Optikposition und damit der Einstrahlwinkel bestimmen. Erzeugt eine Verschiebung einen ungültigen Einstrahlwinkel, so wird der neue Handwurzelpunkt verworfen. Die Wirkungsweise des Verfahrens veranschaulicht die Abbildung 47.

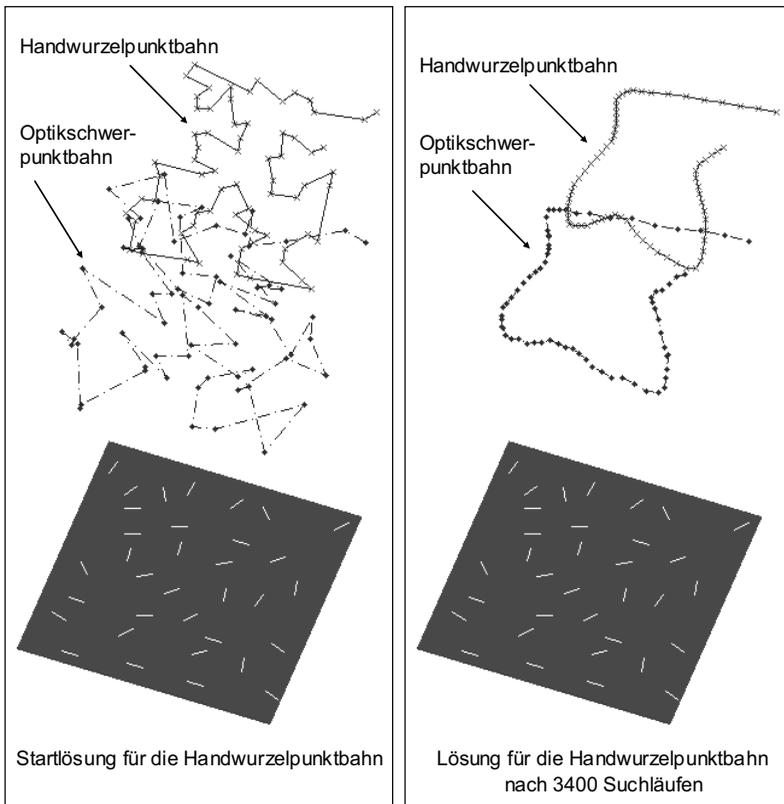


Abbildung 47: Wirkungsweise des Teilverfahrens zur Glättung des Handwurzelpunktpfades, illustriert an einem Beispiel mit 34 Schweißnähten

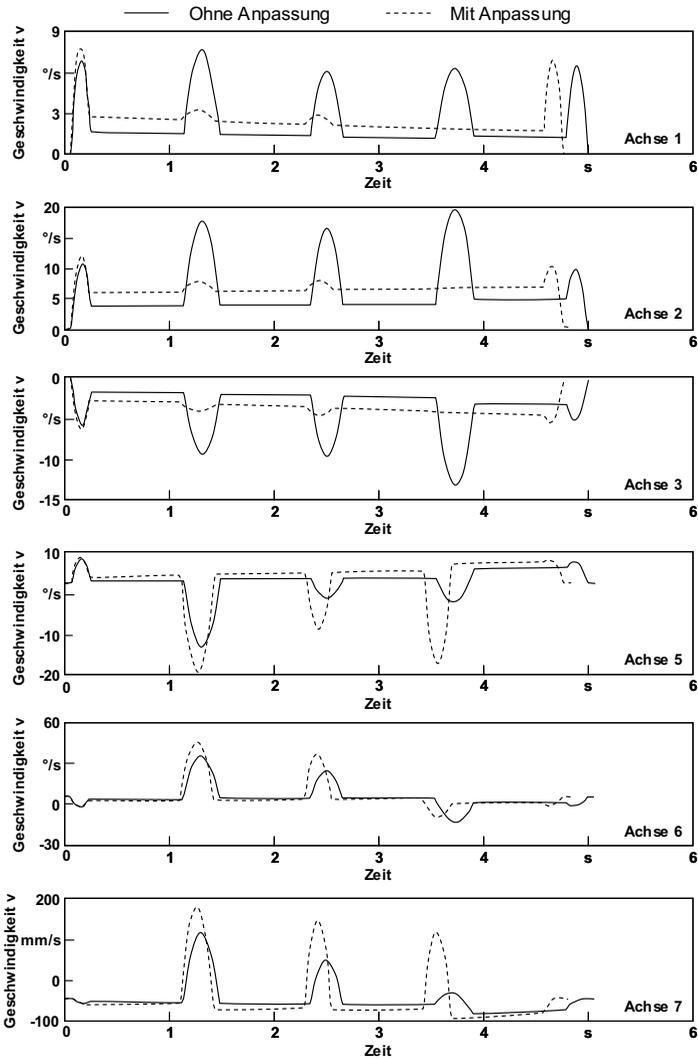


Abbildung 48: Geschwindigkeitsverlauf der Roboterachsen für ein Beispiel mit 4 Nähten (Achse 4 ohne Bewegungsanteile). Im Vergleich zum RLS mit Festoptiken (siehe Abbildung 40) kann die Geschwindigkeit der Hauptachsen deutlich effektiver geglättet werden. Das Verfahren erreicht für dieses Beispiel eine Taktzeiteinsparung von 220 ms (4,5%).

Die mit diesem Verfahren ermittelten Stützpunkte liefern einen geglätteten Bahnverlauf der Handwurzelbewegung. Beim Abfahren dieser Bahn kann jedoch festgestellt werden, dass die Hauptachsen zwischen den Schweißnähten stark beschleunigt und wieder abgebremst werden müssen (siehe Abbildung 48). Dieses Verhalten war bereits im vorangegangenen Kapitel im Abschnitt 4.5.2 zu beobachten.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Fragestellung wird zur Lösung dieses Problems eine modifizierte Version der Geschwindigkeitsglättungsverfahren aus Abschnitt 4.5.2 eingesetzt. Das Verfahren verschiebt die Handwurzelpunkte derart, dass ein möglichst glatter Geschwindigkeitsverlauf der Hauptachsen entsteht. Die Resultate dieses Berechnungsschrittes sind in der Abbildung 48 zu sehen.

5.5 Leistungsfähigkeit des Gesamtverfahrens

In diesem Kapitel wurde ein Ansatz zur Taktzeitoptimierung aufgezeigt, bei dem die Bewegungsplanung des Schweißroboters durch gezielte Veränderung des Handwurzelpunktpfades durchgeführt wird. Dadurch werden die Vorteile der beiden kinematischen Teilketten (Hauptachsen und Handachsen) gezielt ausgenutzt. Dabei kann die Bewegung aufgrund des kinematischen Aufbaus von Anlagen mit Zoomoptiken so geplant werden, dass die Hauptachsen lediglich die Grobpositionierung der Optik übernehmen. Die Handachsen sorgen für die notwendige Orientierungsänderung der Schweißoptik. Dieser Ansatz unterscheidet sich von den Algorithmen für Festoptikanlagen im Kapitel 4 durch die Wahl des betrachteten Stützpunktes.

Die Abbildung 49 zeigt exemplarisch die Unterschiede der erreichbaren Taktzeiten für gegebene Schweißaufgaben unter Verwendung der Algorithmen aus Kapitel 4 und der in diesem Kapitel entwickelten Berechnungsmethoden. Als Referenz dient eine Betrachtung der erreichbaren Taktzeit für Anlagen mit Festbrennweiten.

	Beispiel mit 12 Schweißnähten			Beispiel mit 34 Schweißnähten		
	Algorithmen zur Berechnung des Optikscherpunktpfadendes (Kapitel 4)	Algorithmen zur Berechnung des Optikscherpunktpfadendes (Kapitel 4)	Algorithmen zur Berechnung des Handwurzelpunktpfadendes (Kapitel 5)	Algorithmen zur Berechnung des Optikscherpunktpfadendes (Kapitel 4)	Algorithmen zur Berechnung des Optikscherpunktpfadendes (Kapitel 4)	Algorithmen zur Berechnung des Handwurzelpunktpfadendes (Kapitel 5)
Optiktyp	Festbrennweite	Zoomoptik	Zoomoptik	Festbrennweite	Zoomoptik	Zoomoptik
Tiefenschärfe / Zoombereich [mm]	± 10	± 250	± 250	± 10	± 250	± 250
Optikbrennweite [mm]	882,00			882,00		
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	5,00			5,00		
Gesamte Schweißnahtlänge [mm]	360,00			1020,00		
Gesamter Versatzweg (bezogen auf TCP) [mm]	1252,30			2303,50		
Gesamte Schweißzeit [s]	4,28			12,03		
Gesamte Versatzzeit [s]	3,12	3,01	2,92	8,59	8,22	6,66
Durchschnittliche Versatzgeschwindigkeit [m/min]	24,08	24,96	25,73	16,08	16,81	20,75
Durchschnittliche Zeit pro Naht-einheit (Naht+Versatz) [ms]	617	608	600	701	596	550
Gesamte Taktzeit [s]	7,4	7,3	7,2	20,6	20,3	18,7

Abbildung 49: Erreichbare Taktzeiten für die verschiedenen Anlagen- und Optimierungskonzepte für zwei Schweißbeispiele

Aus diesen Ergebnissen lässt sich Folgendes erkennen:

- Die bloße Adaption der Algorithmen für Schweißanlagen mit Festoptiken auf Konzepte mit einem zusätzlichen Freiheitsgrad zur Einstellung der Strahlrichtung liefert im vorliegenden Fall ein ähnlich gutes Optimierungsergebnis. Kleinere Taktzeiteinsparungen (Beispiel mit 12 Nähten: 1,5%; Beispiel mit 34 Nähten: 1,8%) können durch die bessere Bahnglättung erreicht werden.
- Die Berechnung auf der Basis der Handwurzelpfadoptimierung bietet Vorteile gegenüber der angepassten Optikscherpunktop Optimierung. Bei den

gezeigten Beispielen beträgt die zusätzliche Taktzeiteinsparung 1,2 % (Beispiel mit 12 Nähten) bzw. 7,7 % (Beispiel mit 34 Nähten). Die Entwicklung von angepassten Berechnungskonzepten unter Verwendung der Handwurzelpunktoptimierung für die veränderte Kinematik ist daher sinnvoll.

Weiterführend kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Einsatz von Laseranlagen mit Zoomoptiken nicht zwangsläufig wirtschaftlicher ist als der von Anlagen mit Festoptiken. Die von einer Anlage erreichbare Taktzeit hängt maßgeblich von der Topologie der Schweißaufgabe ab. Es lässt sich aus den Ergebnissen in der Abbildung 49 die Tendenz erkennen, dass Anlagen mit Zoomoptiken für komplexere Schweißaufgaben besser geeignet sind als solche mit fester Brennweite.

Im nachfolgenden Kapitel werden die entwickelten Algorithmen für Anlagenkonzepte mit fester und variabler Brennweite anhand von industriellen Anwendungsbeispielen eingehender untersucht.

6 Beschreibung des Einsatzes der Algorithmen

6.1 Kapitelübersicht

Die beiden vorangegangenen Kapitel zeigen die Konzeption und Implementierung von Bahnplanungsalgorithmen für Remote-Laserstrahlschweißanlagen, die über Optiken mit fester oder variabler Brennweite verfügen. Dabei wurde das Optimierungspotential der einzelnen Teilalgorithmen gegenüber der berechneten Startlösung in den Abschnitten 4.6 und 5.5 anhand einfacher Beispiele aufgezeigt.

Diese theoretischen Bewertungen beantworten jedoch nicht die wichtige Frage danach, welcher Einspareffekt gegenüber konventionellen Roboterprogrammierungsmethoden erzielt werden kann. Dazu werden in diesem Kapitel zwei Anwendungsbeispiele aus der industriellen Produktion eingehend untersucht. Das Ziel ist eine Gegenüberstellung der manuell erzielbaren und der unter Verwendung der in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen berechneten Taktzeiten.

Für den Einsatz der Optimierungsalgorithmen für industrielle Anwendungen ist es zunächst erforderlich, ein geeignetes Konzept zur Bereitstellung der notwendigen Eingangsdaten für die Berechnung zu entwerfen. Im Abschnitt 6.2 erfolgt dazu die Spezifizierung eines aufgabenorientierten Programmiersystems. Der Abschnitt 6.3 zeigt den Einsatz des Systems für die Planung und Auslegung einer Remote-Anlage, bei der verschiedene Maschinenkonzepte miteinander verglichen werden. Der Abschnitt 6.4 beleuchtet die Programmierung einer realen Anlage mit Hilfe der Optimierungsalgorithmen.

6.2 Konzeption eines aufgabenorientierten Programmiersystems

Die Algorithmen, welche in Kapitel 4 und 5 entwickelt wurden, sind in sich geschlossene Softwaremodule, die als Eingangsinformationen eine Aufgabenbeschreibung sowie ein Roboter- und Werkzeugmodell erfordern. Sie selbst generieren Robotercode als Ausgabedaten.

Obwohl die Algorithmen vollautomatisch Roboterprogramme erzeugen können, ist ein direkter Einsatz im Produktionsumfeld nicht ohne zusätzliche Hilfsmittel möglich. Es sind Methoden und Werkzeuge notwendig, die eine effiziente Erstellung der Eingangsinformation ermöglichen. Während Roboter- und Werkzeug-

modelle nur einmalig erstellt werden müssen und dann immer wieder verwendet werden können, bedarf es eines Werkzeugs zur Beschreibung von Schweißaufgaben. Dieses muss sowohl Daten aus 3D-Modellen als auch Nahtpositionen aus einer realen Anlagenumgebung verarbeiten können.

Im Gegensatz zu konventionellen Programmiermethoden, die nur die Generierung einer konkreten Lösung in Form einer Roboterbewegung ermöglichen, kann mit dem modularen Aufbau der Optimierungsalgorithmen ein aufgabenorientiertes Programmiersystem zur Verfügung gestellt werden (siehe Konzept in der Abbildung 50). Die Idee des Konzeptes ist es, die Schweißaufgabe und die Freiheitsgrade für die Bewegung unabhängig von der verwendeten Remote-Anlage zu beschreiben. Dazu ist ein Softwarewerkzeug notwendig, welches die Einstellung der notwendigen Naht- und Schweißparameter unterstützt. Dem Anwender des Systems obliegen die Definition der Nahtpositionen sowie die Einstellung der prozessrelevanten Parameter. Letztere umfassen die Prozessparameter sowie die Prozessfreiheitsgrade. Ein Programmiersystem muss entsprechende Einstellmöglichkeiten bereithalten, um diese Attribute beschreiben zu können. Als Quelle dieser Daten können Versuchsdatenbanken oder das Expertenwissen des Anwenders dienen. Die Bestimmung der Nahtpositionen kann entweder anhand von 3D-Modellen des Bauteils oder am realen Werkstück erfolgen. Das Programmiersystem muss für die Planung von Schweißanlagen über Funktionalitäten zum Umgang mit 3D-Modellen verfügen. Diese beinhalten beispielsweise den Import und die Ausrichtung von Modellen oder die Definition von Frames in der Szene. Anhand der modellbasierten Aufgabendefinition können Roboterprogramme vollständig offline, d.h. fernab der realen Schweißanlage generiert und optimiert werden.

Allerdings können offline generierte Roboterprogramme in der Regel nicht für den direkten Einsatz an der realen Anlage verwendet werden. Dies liegt darin begründet, dass die ideale Repräsentation von geometrischen 3D-Modellen mit der Realität nicht in ausreichendem Maße übereinstimmt. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Häufig werden bauliche Änderungen an der Schweißanlage bei der Montage und Inbetriebnahme aufgrund des hohen Zeitdrucks nicht ausreichend dokumentiert und in den 3D-Modellen nachvollzogen. Häufig ergeben sich zudem durch die Einspannung der zu fügenden Bauteile Verformungen, die zum Zeitpunkt der Modellierung nicht bekannt sind. In fast allen Fällen müssen daher die Programme bei der Übertragung auf die Anlage durch einen Bediener nachjustiert werden. Der generierte Optimierungseffekt geht dabei zu einem Großteil wieder verloren. Um die Berechnungsalgorithmen zur direkten Anla-

genprogrammierung einsetzen zu können, muss die Programmierumgebung demnach über Schnittstellen verfügen, die eine Akquisition von realen Nahtlageinformationen erlauben.

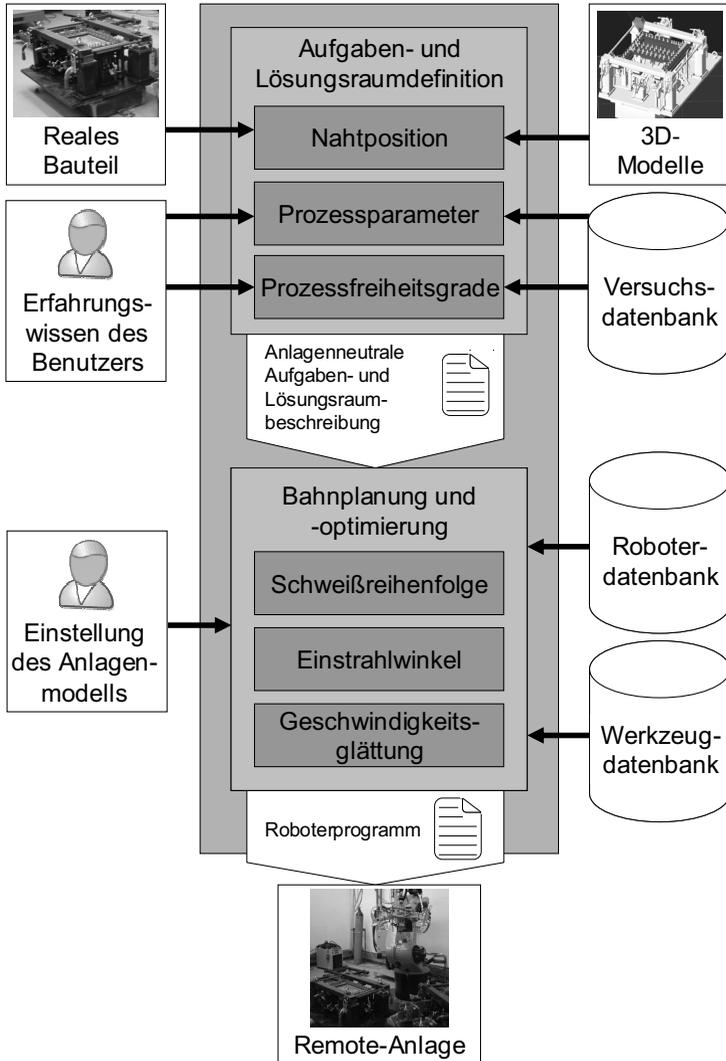


Abbildung 50: Einsatz der Optimierungsalgorithmen innerhalb eines aufgabenorientierten Programmiersystems

Das Ergebnis der Aufgabenbeschreibung ist ein Datenmodell, welches der in Abschnitt 4.2.1 entwickelten Struktur entspricht. Aufgrund des aufgabenorientierten Charakters des Programmiersystems kann die gleiche Aufgabe zur Berechnung für verschiedene Anlagentypen verwendet werden. Dazu muss der Anwender lediglich die gewünschte Roboter- und Werkzeugkonfiguration auswählen. Anhand dieser Einstellung werden die entsprechenden Algorithmen für die vorgegebene Aufgabenbeschreibung gestartet und es wird optimierter Robotercode erzeugt.

Eine beispielhafte Umsetzung des Konzepts zeigen die beiden Abschnitte 6.3 und 6.4. Darin werden die Optimierungsalgorithmen und die konzipierte Programmierumgebung anhand zweier industrieller Anwendungsbeispiele auf ihre Performance und Einsatzfähigkeit hin untersucht.

6.3 Anwendungsbeispiel: Vergleich von Maschinenkonzepten

6.3.1 Charakterisierung des Anwendungsbeispiels

Das erste Anwendungsbeispiel sei folgendermaßen charakterisiert: Ein Hersteller von Karosseriebauteilen plant für die Fertigung eines Sitzbleches den Einsatz einer Remote-Laserstrahlschweißanlage. Das Bauteil besteht aus zwei Schalenelementen, die durch Steppnähte miteinander verschweißt werden sollen. Für die Anlagenauslegung und Wirtschaftlichkeitsbewertung ist die Ermittlung einer möglichst realistischen Taktzeit für zwei alternative Maschinenkonzepte notwendig. Zur Auswahl stehen zwei roboterbasierte Anlagen, die jeweils über eine Optik mit fester Brennweite (Typ: YW50¹⁰) und eine Optik mit variabler Brennweite (Typ: RoboScan¹¹) verfügen. Für einen Vergleich der beiden Anlagenkonzepte sollen die Optimierungsalgorithmen zum Einsatz kommen.

Die beiden geplanten Varianten der Laseranlage umfassen jeweils einen Sechschachs-Knickarm-Roboter vom Typ KR60HA¹² und unterscheiden sich lediglich durch die eingesetzten Optikwerkzeuge. Die verwendete Laserstrahlquelle YLR-8000-R¹³ verfügt über ein Strahlparameterprodukt von 4 mm*mrad bei einer ma-

¹⁰ Hersteller: Precitec KG

¹¹ Hersteller: KUKA Systems GmbH

¹² Hersteller: KUKA Roboter GmbH

¹³ Hersteller: IPG Photonics Corporation

ximalen Leistung von 8 kW. Ein akzeptabler Toleranzbereich des Fokuslagenversatzes in Strahlrichtung wurde für die geplante Anlagentechnik und den verwendeten Stahlwerkstoff experimentell mit einem Wert von ± 20 mm ermittelt (ZAEH et al. 2006a, 2007). Da zum Zeitpunkt der Planung lediglich 3D-Modelle des Bauteils und der Spannvorrichtung vorlagen, wird die Optimierung anhand von 3D-Modellen vorgenommen (siehe Abbildung 51).

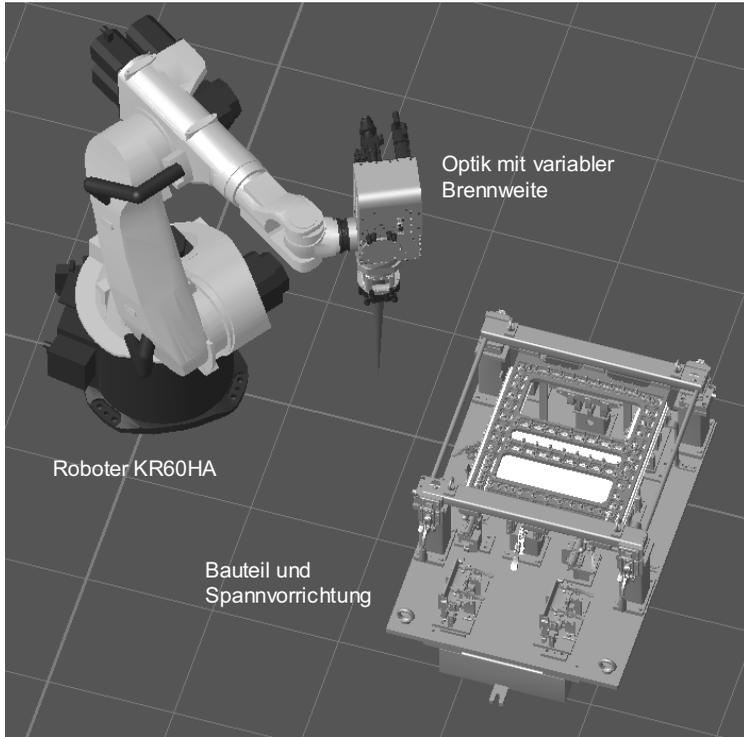


Abbildung 51: 3D-Modelle der wichtigsten Komponenten der projektierten Remote-Laserstrahlschweißanlage

Die Fügeaufgabe umfasst die Verschweißung von zwei Schalenteilen, die in eine Spannvorrichtung eingelegt und darin gegeneinander gedrückt werden. Die Verschweißung soll durch 117 gerade, lasergeschweißte Steppnähte erfolgen. Für die gegebenen Fügepartner wurde durch Grundlagenversuche eine mögliche Schweißgeschwindigkeit von 7,8 m/min bei einer Laserleistung von 4 kW ermittelt. Die erlaubten Einstrahlwinkel betragen jeweils bis zu 30° in stechender und

schleppender Schweißrichtung sowie bis zu 20° in der lateralen Anstellung bezüglich der Flächennormalen in einem Schweißpunkt (vgl. Abschnitt 2.4.1). Eine Übersicht zu den Attributen der Fügeaufgabe und den geplanten Maschinenvarianten gibt die Abbildung 52.

Schweißaufgabe		
Anzahl Schweißnähte []	117	
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	7,80	
Laserleistung [kW]	4,00	
Gesamte Schweißnahtlänge [mm]	2804,00	
Erlaubte schleppende Strahlanstellung [°]	30,00	
Erlaubte stechende Strahlanstellung [°]	30,00	
Erlaubte laterale Anstellung [°]	20,00	
Maschinenkonfiguration		
Robotertyp []	KR60HA	
Lasertyp []	YLR-8000-R	
Optiktyp []	YW50 (Festbrennweite)	RoboScan (variable Brennweite)
Optikbrennweite [mm]	1000,00	882,84
Fokusalgentoleranz [mm]	± 25,00	± 400,00

Abbildung 52: Charakteristik der Schweißaufgabe und der beiden projizierten Maschinenkonfigurationen

6.3.2 Aufgabenbeschreibung innerhalb einer 3D-Umgebung

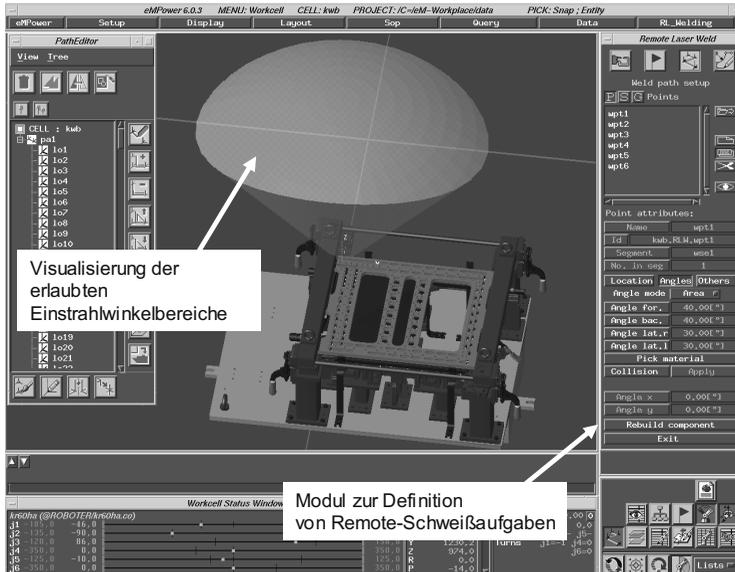
Für die beschriebene Planungsaufgabe existieren 3D-Modelle des Roboters, des Werkzeugs sowie des Bauteils. Daher ist es nahe liegend, die Beschreibung der Fügeaufgabe, also die Extraktion der Nahtinformationen aus den Bauteilmodellen, in eine Offline-Simulationsumgebung einzubetten. Zur beispielhaften Umsetzung wurde die kommerziell erhältliche Robotersimulationsumgebung Robcad¹⁴ verwendet, die über umfangreiche Funktionalitäten zur Manipulation und Interaktion in 3D-Umgebungen verfügt. Mittels der Anwenderprogrammierschnittstelle (API¹⁵) *Rose Development Kit* wurde die Robcad-Umgebung durch ein Modul für die Beschreibung von Remote-Schweißaufgaben erweitert.

Das entwickelte Modul, dessen User-Interface in der Abbildung 53 zu sehen ist, erlaubt die Definition von Nahtlagen und deren Kontur durch die Generierung von Nahtstützpunkten am virtuellen Bauteil. Erzeugte Punkte können anschließend zu Nähten zusammengefasst werden. Die einzelnen Nähte werden mit Pro-

¹⁴ Hersteller: Siemens PLM Software, früher Tecnomatix.

¹⁵ API: engl.: Application Programming Interface

zessparametern, wie der Schweißgeschwindigkeit oder der Laserleistung, beaufschlagt. Zusätzlich ist es möglich, die Freiheitsgrade des Schweißprozesses als Attribute zu hinterlegen. Dies wird in der Abbildung 53 bei der Darstellung der erlaubten Einstrahlwinkelbereiche durch dreidimensionale Kegelkörper, die den stehenden, schleppenden und lateralen Strahlanstellungsbereich repräsentieren, illustriert.



Visualisierung der erlaubten Einstrahlwinkelbereiche

Modul zur Definition von Remote-Schweißaufgaben

Abbildung 53: Erweiterung der Robotersimulationsumgebung Robcad durch ein Modul zur aufgabenorientierten Programmierung von Remote-Schweißaufgaben

Häufig sind die prozesstechnisch realisierbaren Einstrahlwinkelbereiche nicht vollständig für jede Nahtposition gültig. Dies resultiert aus Abschattungen des Laserstrahls zwischen der Bearbeitungsoptik und der Fügestelle, beispielsweise durch Spannvorrichtungen (siehe Abbildung 54). Da jeder Schweißkegel daraufhin geprüft werden muss, ob Strahlabschattung vorliegt, und dies manuell sehr aufwändig ist, wurde ein Verfahren in das Modul integriert, welches die gültigen Winkelbereiche auf Basis von Kollisionserkennungsalgorithmen automatisch ermittelt.

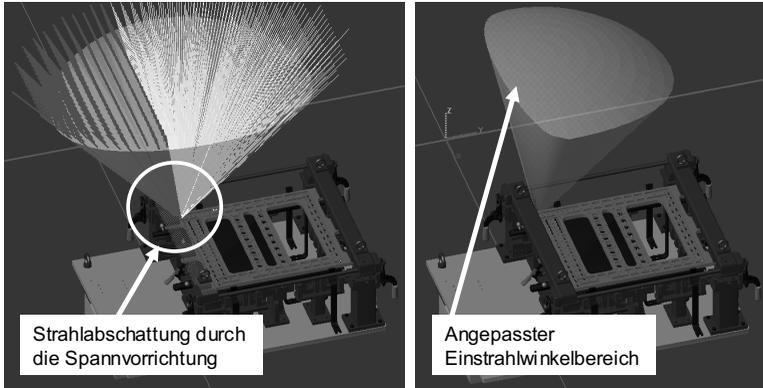


Abbildung 54: Anpassung des Einstrahlwinkels aufgrund von Abschattungen durch die Spannvorrichtung

Das Ergebnis der Aufgabendefinition mit dem gezeigten Modul innerhalb der Robcad-Simulationsumgebung ist eine Datenstruktur, die von den Berechnungsalgorithmen eingelesen und weiterverarbeitet werden kann.

6.3.3 Ergebnisse

Für das Karosseriebauteil wurde mit Hilfe des vorgestellten aufgabenorientierten Programmiersystems aus dem vorangegangenen Abschnitt eine Aufgabenbeschreibung erstellt. Die Einstellung der Prozessparameter und der Prozessfreiheitsgrade erfolgte entsprechend den Ergebnissen der Grundlagenversuche (siehe Abbildung 52). Die Taktzeiten zur Bearbeitung der Fügeaufgabe für die beiden Maschinenkonzepte wurden mittels der beiden entwickelten Optimierungsalgorithmen berechnet. Die Ergebnisse der Berechnung zeigt die Abbildung 55.

Für das Maschinenkonzept mit einer Optik mit variabler Brennweite konnten die Algorithmen eine 10% kürzere Taktzeit gegenüber dem Festoptikkonzept ermitteln. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen für einfachere Beispiele im Abschnitt 5.5 (siehe dazu auch Abbildung 49, S.99). Um den Nutzen des Programmierkonzeptes und der Algorithmen quantifizieren zu können, wurde die gegebene Fügeaufgabe zusätzlich mit konventionellen Programmiermethoden innerhalb einer Robotersimulation programmiert. Die notwendigen Zeitaufwände und die erreichten Ergebnisse sind ebenfalls in der Abbildung 55 enthalten.

Parameter				
Werkzeug	Optik mit fester Brennweite		Optik mit variabler Brennweite	
Programmierverfahren	Offline- Programmierung*	aufgabenorientierte Programmierung	Offline- Programmierung*	aufgabenorientierte Programmierung
Aufwand				
Aufwand zur Modellerstellung [h]	1,0	1,0	0**	0**
Aufwand zur Stützpunktfestlegung [h]	1,0	1,0	0**	0**
Aufwand zur Aufgabedefinition [h]	-	1,5	-	0**
Aufwand zur Programmoptimierung [h]	4,0	0,5	4,0	0,5
Gesamtaufwand [h]	6,0	4,0	4,0	0,5
Ergebnisse				
Gesamter Versatzweg (bezogen auf TCP) [mm]	4176	3630	4176	3630
Gesamte Schweißzeit [s]	21,6	21,6	21,6	21,6
Gesamte Versatzzeit [s]	33,2	21,0	31,4	17,0
Durchschnittliche Versatzgeschwindigkeit [m/min]	7,5	10,4	8,0	12,8
Durchschnittliche Zeit pro Nahteinheit (Naht+Versatz) [ms]	468	364	453	330
Gesamte Taktzeit [s]	54,8	42,6	53,0	38,6

* Konventionelle Programmierung durch Simulationsexperten

** Verwendung der Teilergebnisse aus den Versuchen mit Festoptiken

Abbildung 55: Ergebnisse des Einsatzes der Optimierungsalgorithmen und des aufgabenorientierten Programmiersystems für das Anwendungsbeispiel

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse sind folgende Punkte bemerkenswert:

- Der Einsatz von konventionellen Roboterprogrammiermethoden liefert bei Weitem keine optimale Lösung für eine komplexe Fügeaufgabe. Dies zeigen die Ergebnisse, die mit dem entwickelten Bahnplanungsverfahren erzielt wurden. Beim Anlagenkonzept mit fester Brennweite konnte durch den Algorithmeinsatz eine Reduzierung der Taktzeit von 54,8 s auf 42,6 s (Einsparung von 22%) und beim Konzept mit variabler Brennweite von 53,0 s auf 38,6 s (Einsparung von 27%) erreicht werden. Zudem hängt das ermittelte Ergebnis bei der konventionellen Programmierung sehr stark von der Erfahrung und Intuition des jeweiligen Benutzers ab. Die Berechnungsalgorithmen können somit bei der Auslegung und Konzeption von Laseranlagen die Planungssicherheit erhöhen und eine Überdimensionierung vermeiden helfen.

- Die Optimierung eines Roboterprogramms mit konventionellen Methoden innerhalb einer Simulationsumgebung basiert auf der Manipulation von einzelnen Stützpunkten durch den Bediener. Dabei spielt die initial festgelegte Reihenfolge der Schweißnähte eine große Rolle für das Optimierungsergebnis. Dies ist sehr deutlich in der Abbildung 55 zu erkennen. Die manuelle Suche einer Schweißreihenfolge liefert eine Gesamtlänge der TCP-Bahn, die um 15% größer ist, als die berechnete Lösung. Eine Änderung der Reihenfolge und damit auch der einzelnen Stützpunktorientierungen ist sehr zeitaufwändig. Die ungerichtete und umständliche Generierung einer optimalen Roboterbahn mit konventionellen Methoden für ein Maschinenkonzept erfordert daher auch einen um ca. 50% höheren zeitlichen Aufwand als bei der Verwendung der entwickelten Programmiermethode. Noch größer wird der Unterschied, wenn mehrere Anlagenkonzepte miteinander verglichen werden müssen.

6.4 Anwendungsbeispiel: Programmierung einer Remote-Anlage

6.4.1 Charakterisierung des Anwendungsbeispiels

Das zweite Anwendungsbeispiel sei wie folgt umrissen: Ein Hersteller von Sitzen für Automobile verfügt über eine Remote-Laseranlage, deren Strahlpositioniersystem aus einem Sechs-Achs-Knickarm-Roboter vom Typ KR60HA sowie einer Zoomoptik vom Typ RoboScan besteht. Die Anlage fertigt die beiden Teilelemente einer Rücksitzbank für Pkw-Fahrzeuge. Jedes Bauteil besteht aus mehreren Blechelementen, die durch lasergeschweißte Überlappverbindungen miteinander gefügt werden. Die wichtigsten Komponenten der Anlagentechnik zeigt die Abbildung 56.

Innerhalb der Schweißzelle sind zwei Spannvorrichtungen für die beiden Bauteile nebeneinander angeordnet. Die Anlage wurde von Roboterexperten mit konventionellen Teach-in-Methoden programmiert. Allerdings kann die angestrebte Taktzeit durch die konventionell erzeugten Programme nicht erreicht werden. Um die Produktivität der Anlage zu erhöhen, sollen die Algorithmen eingesetzt werden.

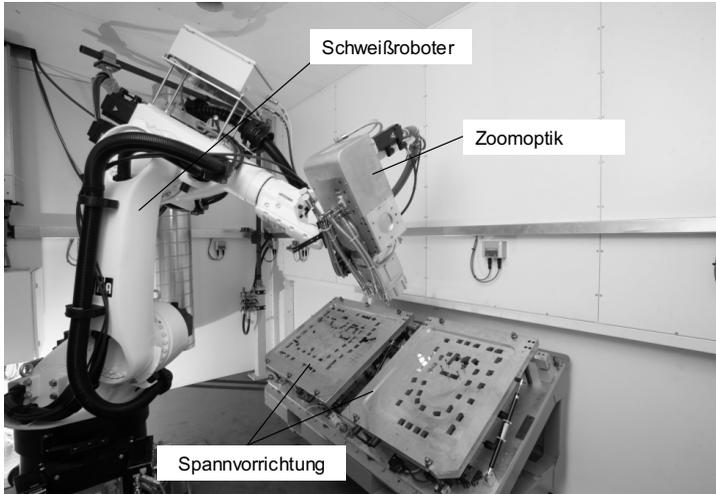


Abbildung 56: Verwendete Anlagentechnik (Quelle: RIPPL 2008)

Die beiden Bauteile decken jeweils 40% bzw. 60% der Sitzlehne ab und sollen mit 46 bzw. 67 lasergeschweißten Steppnähten gefügt werden. Für die einzelnen Nahtsegmente sind, abhängig von der Blechstärke, unterschiedliche Schweißgeschwindigkeiten vorgegeben. Diese liegen zwischen 3 m/min und 8 m/min. Für den vorliegenden Stahlwerkstoff wurden vom Anlagenhersteller im Vorfeld gültige Einstrahlwinkelbereiche von 25° in stehender und schleppender sowie 15° in lateraler Strahlanstellung ermittelt. Eine Übersicht zu den beiden Schweißaufgaben sowie der verwendeten Anlagentechnik gibt die Abbildung 57.

Schweißaufgabe		
Bauteil	Bauteil 1 (40%-Lehne)	Bauteil 2 (60%-Lehne)
Anzahl der Schweißnähte []	46	67
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	4,6 bis 8,0	3,0 bis 8,0
Laserleistung [kW]	5,00	5,00
Gesamte Schweißnahtlänge [mm]	862	1268
Erlaubte schleppende Strahlanstellung [°]	25,00	
Erlaubte stehende Strahlanstellung [°]	25,00	
Erlaubte laterale Anstellung [°]	15,00	
Maschinenkonfiguration		
Robotertyp []	KR60HA	
Optiktyp []	RoboScan (variable Brennweite)	
Optikbrennweite [mm]	882,84	
Fokuslagentoleranz [mm]	± 400	

Abbildung 57: Charakteristik der beiden Schweißaufgaben und der verwendeten Remote-Anlage

6.4.2 Aufgabenbeschreibung am realen Bauteil

Bei diesem Anwendungsbeispiel konnte nicht auf aktuelle 3D-Modelle der Bauteile, der Spannvorrichtungen sowie des Zellenlayouts zurückgegriffen werden, da baulichen Änderungen während der Zellenmontage und kurzfristige Modifikationen der Spannvorrichtungen nicht nachmodelliert wurden. Dies charakterisiert die typische Situation bei der Programmierung von Anlagen unter Baustellenbedingungen.

Zur Gewinnung von Nahtlageinformationen aus der realen Schweißanlage wurde ein von VOGL (2005) entwickeltes, intuitives Roboterprogrammiersystem verwendet. Das System besteht aus einem Tracking-Sensor, der einen Eingabestift im Raum erfassen kann, sowie einem Laserprojektor, der die aufgenommenen Schweißnähte als Linien auf das Bauteil projiziert (siehe Abbildung 58). Dadurch können Schweißaufgaben sehr effizient direkt am realen Bauteil durch das Antasten der gewünschten Nahtpositionen mit dem Eingabestift definiert werden. Auf diese Weise können Liniensegmente einfach und intuitiv erzeugt, selektiert, gelöscht oder verschoben werden (siehe auch REINHART et al. 2008, REINHART et al. 2007, ZAEH & VOGL 2006, ZAEH et al. 2006b).

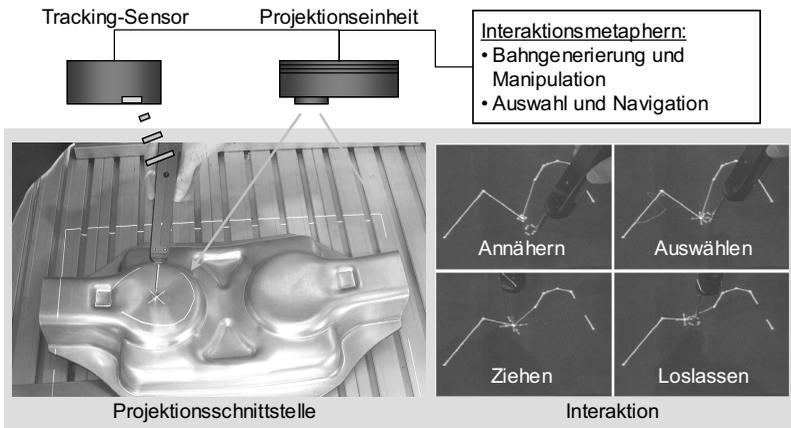


Abbildung 58: Komponenten und Funktionsweise des interaktiven Programmiersystems (nach ZAEH & VOGL 2006)

Für den Einsatz des intuitiven Programmiersystems ist eine Kalibrierung des Systems für den Arbeitsraum des Roboters erforderlich. Die Kalibrierung erfolgt dabei analog zu Verfahren einer Kamerakalibrierung auf Basis von Korrespondenzen zwischen Bild- und Raumpunkten (vgl. bspw. HARTLEY & ZISSERMAN 2003). Dabei werden bekannte Positionen innerhalb der Schweißzelle mit reflektierenden Markierungen versehen (siehe Abbildung 59, links). Diese dienen als Referenz für die Kalibrierung des Laserprojektors, der automatisch die reflektierenden Oberflächen der Marker finden und daraus seine Position innerhalb der Schweißzelle bestimmen kann. Zur Kalibrierung des Eingabestiftes werden ebenfalls die Referenzmarken verwendet. Dabei muss jede Markierung einmalig mit dem Eingabestift angetastet werden. Nach vollständiger Kalibrierung ist die Position des Eingabestiftes im Roboterkoordinatensystem bekannt.

Zur Definition der Schweißnähte am realen Bauteil projiziert der Projektor ein Fadenkreuz aus zwei Laserlinien, welches dem Eingabestift folgt. Durch Antasten einer gewünschten Position und Betätigung einer Aktivierungs-Taste am Eingabestift werden die Stützpunkte einer Schweißnaht sukzessive festgelegt. Der Laserprojektor stellt die gewünschte Schweißnaht als Laserlinie am Bauteil dar (siehe Abbildung 59, rechts).

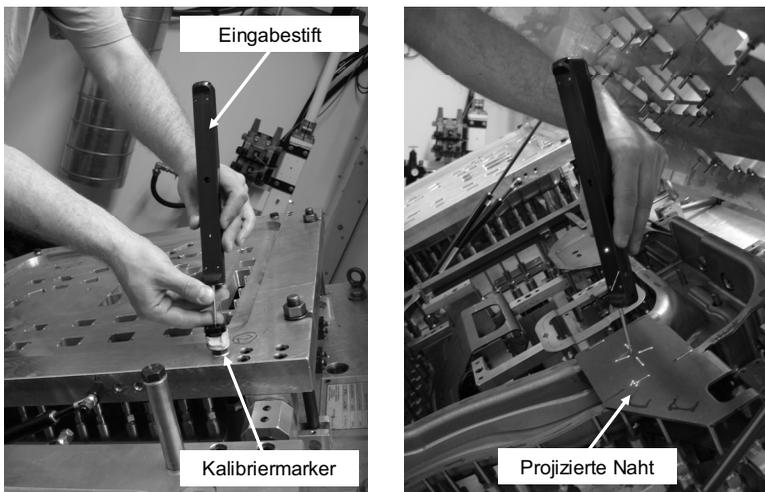


Abbildung 59: Kalibrierung des intuitiven Eingabesystems (links) und Definition von Schweißnähten am realen Bauteil (rechts)

6.4.3 Ergebnisse

Die Schweißnahtlagen der beiden Bauteile wurden mittels des intuitiven Eingabesystems ermittelt. Die Einstellung der Prozessparameter und der Prozessfreiheitsgrade für diesen Datensatz geschah innerhalb des aufgabenorientierten Programmiermoduls (siehe Abschnitt 6.3.2) entsprechend den Vorgaben für das Anwendungsbeispiel (siehe Abbildung 57).

Unter Verwendung der Optimierungsalgorithmen wurden Roboterbewegungsbahnen für die beiden Bauteile berechnet. Die erzielten Ergebnisse sind in der Abbildung 60 zusammengefasst. Zum Vergleich werden ebenfalls die Zeitaufwände und die Ergebnisse der konventionellen Teach-in-Programmierung für die beiden Bauteile angegeben, die von erfahrenen Roboterprogrammierern durchgeführt wurde.

Parameter				
Bauteil	Bauteil 1 (40%-Lehne)		Bauteil 2 (60%-Lehne)	
Programmierverfahren	Konventionelles Teach-in-Verfahren	aufgabenorientierte Programmierung	Konventionelles Teach-in-Verfahren	aufgabenorientierte Programmierung
Aufwand				
Aufwand zur Stützpunktfestlegung [h]	0,5	0,2	0,7	0,3
Aufwand zur Aufgabendefinition [h]	-	1,0	-	1,0
Aufwand zur Programmoptimierung [h]	4,0	0,2	6,0	0,2
Gesamtaufwand [h]	4,5	1,4	6,7	1,5
Ergebnisse				
Gesamte Schweißzeit [s]	7,1	7,1	13,7	13,7
Gesamte Versatzzeit [s]	12,1	8,9	15,7	10,2
Durchschnittliche Zeit pro Nahteinheit (Naht+Versatz) [ms]	418	348	439	357
Gesamte Taktzeit [s]	19,2	16,0	29,4	23,9

Abbildung 60: Aufwände und Ergebnisse zur Programmierung des Anwendungsbeispiels (jeweils separat für jedes Bauteil)

Die Ergebnisse aus diesem Anwendungsbeispiel zeigen folgende wichtige Aspekte:

- Wie in der Abbildung 60 zu sehen ist, ermitteln die Optimierungsalgorithmen Roboterbahnen, mit denen die Bauteile des Anwendungsbeispiels in einer deutlich kürzeren Taktzeit gefertigt werden können (Reduzierung um 17% bei Bauteil 1 bzw. 19% bei Bauteil 2). Der Einsatz von automati-

sierten Bahnplanungsverfahren kann somit für den Betreiber eine drastische Produktivitätssteigerung der kapitalintensiven Laseranlage bewirken.

- Der Einsatz eines aufgabenorientierten Programmiersystems in Verbindung mit einem intuitiven Eingabesystem nach ZAEH & VOGL (2006) erlaubt die Generierung von Roboterbahnen innerhalb einer deutlich kürzeren Zeit, als dies mit herkömmlichen Roboterprogrammierverfahren möglich ist. Für dieses Anwendungsbeispiel beträgt der zeitliche Aufwand zur vollständigen Programmierung der Bauteile lediglich 30% der bei der konventionellen Teach-in-Methode notwendigen Zeit.

Zusammenfassend lässt sich für die beiden Anwendungsbeispiele feststellen, dass die entwickelten Optimierungsverfahren deutliche Taktzeitvorteile für Roboterbewegungsbahnen erzielen können. Die Integration der Berechnungsverfahren in ein aufgabenorientiertes Programmiersystem ermöglicht zusätzlich die Reduzierung der Programmierzeiten für Remote-Laserstrahlschweißanlagen. Eine Abschätzung des wirtschaftlichen und technischen Nutzens der entwickelten Optimierungsalgorithmen wird im nächsten Kapitel vorgenommen.

7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

7.1 Kapitelübersicht

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen exemplarischen Einsatzmöglichkeiten bilden die Grundlage für eine technische und wirtschaftliche Bewertung der in dieser Arbeit entwickelten Optimierungsalgorithmen. Im Abschnitt 7.2 wird zunächst eine allgemeine, kritische Auseinandersetzung mit den technischen Eigenschaften der entwickelten Optimierungssysteme vorgenommen. Dabei werden diese den heute verfügbaren konventionellen Programmiermethoden vergleichend gegenübergestellt. Ausgehend von den ermittelten Ergebnissen des Algorithmenesatzes zur Anlagenplanung und zur operativen Anlagenprogrammierung, analysiert der Abschnitt 7.3 die Wirtschaftlichkeit des Algorithmenesatzes. Dabei erfolgt eine Gegenüberstellung der Nutzeneffekte und der erforderlichen Aufwände.

7.2 Technische Bewertung

Mit den vorgestellten Optimierungsalgorithmen und deren Einsatz innerhalb einer aufgabenorientierten Programmierumgebung werden im Vergleich zu den bisher verfügbaren manuellen Methoden der RLS-Programmierung, folgende Vorteile erzielt:

- Der zentrale Nutzen der entwickelten Optimierungsalgorithmen ist die deutliche Reduzierung der notwendigen Taktzeit zur Fertigung eines Bauteils beim roboterbasierten RLS. In den gezeigten Beispielen konnten, abhängig vom betrachteten Anlagentyp, Einspareffekte zwischen 17% und 27% im Vergleich zu den heute eingesetzten manuellen Programmierverfahren erzielt werden.
- Der Einsatz der Algorithmen erfordert eine abgestimmte Programmierumgebung, welche die Definition von Aufgabenbeschreibungen unterstützt. Dazu wurde ein aufgabenorientiertes System vorgestellt, welches die Dateneingabe sowohl anhand von CAD-Modellen als auch anhand von realen Bauteilen berücksichtigt. Dadurch ist die Verwendung der Algorithmen für die Planung und die operative Programmierung von Anlagen gleichermaßen möglich.

- Der aufgabenorientierte Programmieransatz ermöglicht es Anwendern, sehr schnell zeitoptimale Roboterprogramme zu erzeugen. Der zeitliche Einspareffekt innerhalb der betrachteten Beispiele beträgt bei Planungsszenarien bis zu 50%, bei der Programmierung realer Anlagen bis zu 70%. Natürlich können diese Daten nicht direkt in verallgemeinerter Form auf andere Beispiele übertragen werden. Die Tendenz, Programme wesentlich schneller ableiten zu können, wurde allerdings auch beim Einsatz der gezeigten Systeme für andere Schweißaufgaben beobachtet.
- Die Anwendung der Optimierungsfunktionalitäten für Anlagenplanungsaufgaben ermöglicht es zum einen, wesentlich zuverlässigere Aussagen über die erzielbare Taktzeit zu treffen. Zum anderen ist ein Vergleich von Anlagenkonzepten sehr einfach durchführbar. Für den Anlagenbauer bietet dies den Vorteil einer wesentlich höheren Planungssicherheit. Zudem kann die Über- oder Unterdimensionierung von Anlagen vermieden werden.
- Der Algorithmeinsatz für die operative Programmierung von Schweißanlagen bietet den Vorteil, eine deutlich kürzere Taktzeit zur Fertigung eines Bauteils zu erreichen. Für den Anlagenbetreiber bedeutet dies, dass eine wesentlich höhere Ausbringung ohne zusätzliche technische Einrichtungen erzielt werden kann.
- Die Berechnung von Schweißaufgaben durch die Optimierungsalgorithmen stellen lediglich geringe Anforderungen an die verwendete Hardware. Bei einer durchschnittlichen Berechnungsdauer von 15 s pro Nahtelement (vgl. Abbildung 55 und Abbildung 60) können auch umfangreiche Schweißaufgaben in einer annehmbaren Zeit mit handelsüblichen PCs optimiert werden. Zusätzliche technische Einrichtungen sind nicht zwingend erforderlich.

Die entwickelte Programmiermethodik und die Optimierungsalgorithmen wurden bei zahlreichen Schweißaufgaben im Laserlabor des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München (*iwb*) sowie für industrielle Anwendungen erprobt. Aus den dabei gesammelten Erfahrungen und Beobachtungen können folgende Aussagen zu den Defiziten bzw. technischen Restriktionen des Systems abgeleitet werden:

- Die Algorithmen können vollautomatisch Roboterbewegungsbahnen innerhalb eines eingestellten Arbeitsbereichs berechnen. Bei Anlagen mit

Festoptiken ist es allerdings notwendig, die Startposition des Roboters einmal von Hand für diesen Arbeitsbereich einzustellen. Andernfalls neigen sie bei schlechter Erreichbarkeit aller Nahtpunkte im Arbeitsraum dazu, Bewegungsbahnen zu erzeugen, die einen Konfigurationswechsel auf der Bahn bewirken. Beim Abfahren der Bahn führt dies dazu, dass der Roboter starke Umorientierungsbewegungen durchführen muss. Eine automatische Ermittlung einer geeigneten Startpose für den vorgegebenen Arbeitsbereich wurde bislang noch nicht zufrieden stellend implementiert. Allerdings wurden Funktionalitäten in die 3D-Umgebung integriert, die eine nachträgliche manuelle Anpassung der Optikorientierung ermöglichen. Damit konnte bislang jede Schweißaufgabe zumindest teilautomatisch optimiert werden. Bei Anlagen mit Zoomoptiken stellt dies aufgrund der einfacheren Posenbestimmung durch die Vernachlässigung der Achse 4 kein Problem dar.

- Die Bewegungen des Schweißroboters können heute lediglich als Achswinkellisten der Robotersteuerung im Interpolationstakt übergeben werden. Damit ist eine nachträgliche Modifikation der Bewegung am realen Roboter ausgeschlossen. Die Übergabe der Bewegung als Liste wurde gewählt, weil heutige Industrierobotersteuerungen im Regelfall nicht in der Lage sind, Redundanzen nach vorgegebenen Regeln aufzulösen und die Sollwerte für die Lageregelung selbst zu berechnen (ZIMMERMANN & SONNER 2008, SCHREIBER 2004). Einen sehr viel versprechenden Ansatz, um dieses Problem zu lösen, verfolgt der Roboterhersteller KUKA Roboter GmbH mit der Erweiterung der Robotersteuerung durch splinebasierte Interpolationsfunktionen mit zusätzlichen Redundanzparametern (siehe ZIMMERMANN & SONNER 2008). Erste Versuche, bei denen die berechneten Bahnen in entsprechende Befehlssätze übersetzt wurden, verliefen sehr viel versprechend.
- Die Bahnberechnung berücksichtigt beim derzeitigen Entwicklungsstatus lediglich die Strahlabschattung. Weiterführende automatische Kollisionsvermeidungsstrategien wurden bislang nicht implementiert. Bei Schweißaufgaben im industriellen Umfeld kann dieser Aspekt jedoch meist nicht vernachlässigt werden. Daher wurden Funktionalitäten in die 3D-Simulationsumgebung integriert, die es dem Anwender erlauben, das Berechnungsergebnis manuell anzupassen.

- Bei der operativen Roboterprogrammierung sieht das gezeigte Konzept vor, die Daten mittels eines intuitiven Eingabesystems zu ermitteln. Die Schweißparameter und die Freiheitsgrade des Prozesses werden manuell in der 3D-Simulationsumgebung eingegeben. Dieser Ansatz erfordert jedoch, dass der Anwender über das entsprechende Wissen zum Umgang mit 3D-Simulationen verfügt. Der Paradigmenwechsel von der manuellen Generierung von Roboterbewegungen hin zur aufgabenorientierten Programmierung erfordert Überzeugungsarbeit sowie Schulungsmaßnahmen für die Mitarbeiter.

7.3 Wirtschaftliche Bewertung

Um eine quantitative Einschätzung des wirtschaftlichen Nutzenpotenzials der vorgestellten Optimierungsalgorithmen zu erhalten, wird nachfolgend eine beispielhafte Wirtschaftlichkeitsrechnung erläutert. Da Einspareffekte bei der Verwendung der Berechnungsmethodik für Planungsaufgaben relativ schwer monetär erfassbar sind, wird eine operative Anlagenprogrammierung betrachtet.

Dazu werden die folgenden Kosten- und Nutzeneffekte angenommen, deren Zusammensetzungen der Abbildung 61 entnommen werden können:

- Der Investitionsaufwand für ein Optimierungssystem beläuft sich auf 64.000 € und beinhaltet Kosten für die notwendigen Softwaremodule sowie die intuitive Programmierumgebung. Bei einer angestrebten Nutzungsdauer von 5 Jahren und einem Zinssatz von 9% sowie bei jährlichen Wartungskosten, die 5% des Investitionswertes entsprechen, ergeben sich jährliche Kosten von ca. 19.000 €.
- Die jährlichen Kosten einer Remote-Laseranlage werden zu ca. 350.000 € angenommen. Diese ergeben sich aus einer geschätzten Investitionssumme von ca. 870.000 € bei einer Abschreibung auf 7 Jahre mit einer kalkulatorischen Verzinsung von 9%. Hinzu kommen jährlich jeweils 5% der Investitionssumme für Betriebskosten und Wartungskosten sowie die Kosten von zwei Maschinenbedienern im 2-Schichtbetrieb.
- Durch den Einsatz der Algorithmen können auf einer Remote-Laseranlage 20% mehr Bauteile in einer Zeiteinheit gefertigt werden. Dadurch können von den jährlichen Kosten der Remote-Anlage ca. 70.000 € eingespart werden.

Investitionskosten für ein Optimierungssystem		
Optimierungssoftware		20.000 €
3D-Simulationssoftware		15.000 €
Intuitives Eingabesystem		22.000 €
Rechnereinheit		2.000 €
Peripherie		5.000 €
Gesamtinvestition	Io	64.000 €
Jährliche Kosten des Optimierungssystems		
Investitionskosten	Io	64.000 €
Nutzungsdauer	To	5 a
Kalkulatorische Abschreibung	$KAo = Io / To$	12.800 €/a
Zinssatz	Z	9 %
Kalkulatorischer Zinssatz	$KZo = Z \times Io / 2$	2.880 €/a
Wartungskosten	Wo	3.200 €/a
Jährliche Kosten	$NAo = KAo + KZo + Wo$	18.880 €/a
Investitionskosten für eine Remote-Laseranlage		
Roboter		50.000 €
Optik		20.000 €
Strahlquelle		600.000 €
Schweißzelle		150.000 €
Peripherie		50.000 €
Gesamtinvestition	IRLS	870.000 €
Jährliche Kosten der Remote-Laseranlage		
Investitionskosten	IRLS	870.000 €
Nutzungsdauer	TRLS	7 a
Kalkulatorische Abschreibung	$ARLS = IRLS / TRLS$	124.286 €/a
Zinssatz	ZRLS	9 %
Kalkulatorischer Zinssatz	$KRLS = ZRLS \times IRLS / 2$	39.150 €/a
Wartungskosten	WRLS	43.500 €/a
Betriebskosten	BRLS	43.500 €/a
Personalkosten	PM (Maschinenbediener)	50.000 €/a
Anzahl Maschinenbediener	AM	2
Gesamtkosten pro Jahr	$FRLS = ARLS + KRLS + WRLS + BRLS + (PM \times AM)$	350.436 €/a
Nutzen und Amortisation		
Einspareffekt p.a.	E	20 %
Kostenvorteil p.a.	$G = E \times FRLS$	70.087 €
Amortisationszeit (statisch)	$TA = Io / G$	0,91 a

Abbildung 61: Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von Optimierungsalgorithmen beim RLS

Anhand dieser beispielhaften Rechnung wird deutlich, dass sich die zusätzliche Investition für die Optimierungsalgorithmen bereits nach einem Jahr amortisiert. Da Remote-Laseranlagen sehr teuer sind, werden diese meist für Großserien eingesetzt, d.h. eine Umprogrammierung der Anlage wird nur selten vorgenommen. Daher ist es wahrscheinlich, dass ein Betreiber einer Remote-Anlage eher einen Dienstleister für die Optimierung hinzuzieht, anstatt selbst in die Algorithmen zu investieren. In Abhängigkeit der zu erwartenden Losgrößen muss hier die richtige Strategie gewählt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Laserstrahlschweißen ist ein wichtiges Verfahren für die industrielle Füge-technik. Zur Senkung der Stückkosten von Produkten, die mit diesem kapitalintensiven Verfahren hergestellt werden, wurden in jüngster Zeit neue Strategien entwickelt, um die Produktivität von Laseranlagen zu erhöhen. Ein viel versprechender Ansatz ist dabei das Remote-Laserstrahlschweißen, bei dem der Laserstrahl in einer Entfernung von bis zu einem Meter fokussiert werden kann. Ein wesentlicher Vorteil von Remote-Laseranlagen ist die Möglichkeit der deutlich schnelleren Umpositionierung des Brennflecks am Bauteil, wodurch die unproduktive Versatzzeit zwischen Schweißnahtelementen deutlich reduziert werden kann. Für dreidimensionale Bauteile kommen zur Positionierung des Laserstrahls Industrieroboter in Kombination mit speziellen Schweißoptiken für die Remote-Bearbeitung zum Einsatz. Heute erhältliche Ausprägungen derartiger Optiken verfügen zum Teil über feste und zum Teil über variable Brennweiten.

Eine Analyse des Remote-Laserstrahlschweißens im Kapitel 2 dieser Arbeit stellte klar, dass Remote-Anlagen als hochredundante Systeme zu verstehen sind. Der hohe Redundanzgrad resultiert dabei zum einen aus den Freiheitsgraden des Strahlpositioniersystems, zum anderen aus dem Schweißprozess selbst, der eine gewisse Toleranz bei Lage- und Orientierungsvariationen gegenüber einer Sollposition aufweist. Somit ist es möglich, durch die Programmierung geeigneter Roboterposen eine Reduzierung der Taktzeit bei der Schweißung eines Bauteils zu erzielen.

Das Kapitel 3 erläuterte die heute bekannten Methoden zur Programmierung von industriellen Robotersystemen. Dazu wurden zunächst die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung und Berechnung von Roboterposen und -achslagen bereitgestellt. Es zeigte sich, dass die heute im industriellen Umfeld eingesetzten Programmiermethoden lediglich für die Behandlung von nicht redundanten Robotersystemen ausgelegt sind. Zur Reduzierung der Taktzeit werden häufig Optimierungsansätze gewählt, die eine Verkürzung und Glättung des Werkzeugpfades zum Ziel haben. Die Optimierung der Roboterbahn erfolgt dabei durch langwieriges Ausprobieren von Lösungen durch den Anwender. Die Qualität der manuell ermittelten Roboterbewegung hängt in hohem Maße von dessen Erfahrung und Intuition ab. Es besteht daher ein enormer Bedarf an automatischen Bahnplanungs- und Optimierungsverfahren.

Automatische Bahnplanungsverfahren sind seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Man unterscheidet dabei globale und lokale Bahnplanungsverfahren. Das Ziel der globalen Planung ist die Generierung eines Roboterpfades, der vorgegebene Anforderungen erfüllt. Die überaus meisten Verfahren innerhalb dieser Klasse behandeln die Ermittlung von kollisionsfreien Roboterbewegungen. Ansätze zur Reduzierung der benötigten Zeit für eine Bewegung adressieren analog zur manuellen Programmierung die Verkürzung und Glättung des Werkzeugpfades. Die lokalen Bahnplanungsverfahren behandeln die Optimierung des Bewegungsverhaltens eines Roboters entlang eines vorgegebenen Pfades. Man unterscheidet dabei Algorithmen, die eine Bewegung entlang einer exakt vorgegebenen Bahn („path constrained“) oder zwischen Pfadstützpunkten („Point-to-Point“) ermitteln. Da für das Bewegungsverhalten von Remote-Schweißrobotern sowohl Aspekte der globalen als auch der lokalen Bahnplanung wichtig sind, können die heute bekannten Ansätze die Zeitoptimalität für schnelle Versatzbewegungen nicht in vollem Umfang realisieren. Es war daher die Entwicklung von Algorithmen notwendig, die das volle Potential der Remote-Technologie durch die Berechnung von geeigneten Roboterbahnen ausnutzen können.

Im Kapitel 4 dieser Arbeit wurden Algorithmen für die Berechnung von zeitoptimalen Roboterbewegungen für Remote-Anlagen mit Optiken fester Brennweite entwickelt. Der Optimierungsansatz sieht vor, das zeitliche Bewegungsverhalten durch die Verkürzung und Glättung des Optikpfades zu realisieren. Dieser Ansatz wurde gewählt, weil dadurch die Vorteile der einzelnen Roboterachsen effektiver ausgenutzt werden können, als dies durch eine Optimierung des TCPF-Pfades möglich wäre. Im Idealfall geschieht die Umorientierung der Schweißoptik durch die leichteren und somit schnelleren Roboterhandachsen, während die Hauptachsen eine günstige Vorpositionierung der Optik über dem Bauteil realisieren. Es wurden dazu für die Berechnung notwendige Datenmodelle vorgestellt, welche die Anlagentechnik und die Schweißaufgabe abbilden können. Ausgehend von diesen Modellen wurden Berechnungsverfahren entwickelt, die sowohl die Topologie der Schweißaufgabe als auch die Einzeldynamik der Roboterachsen berücksichtigen. Anhand von einfachen Schweißbeispielen wurde die Wirkungsweise der entwickelten Algorithmen analysiert. Dabei zeigte sich, dass die berechneten Roboterbahnen die Hauptachsbeziehung deutlich harmonisieren. Der Großteil der Umorientierung wird durch die schnellen Handachsen realisiert. Aufgrund des kinematischen Aufbaus von Anlagen mit Festoptiken ist eine voll-

ständige Entkopplung der Haupt- und Handachsbeziehung allerdings nicht möglich.

Anders stellt sich die Situation bei Anlagenkonzepten mit variablen Brennweiten dar. Durch die Erweiterung der kinematischen Freiheitsgrade ist eine vollständig entkoppelte Bewegungsplanung der Haupt- und Handachsen möglich. Dementsprechend wurden im Kapitel 5 Algorithmen vorgestellt, die eine derartige Bewegungsplanung gewährleisten. Als Planungsgrundlage dienen in diesem Fall erweiterte Datenmodelle der Schweißoptik. Die Bewegungsplanung basiert auf den entwickelten Teilalgorithmen aus dem Kapitel 4 und wurde durch spezifische Berechnungsmethoden für die Handwurzelbewegung erweitert. In einer vergleichenden Untersuchung konnten Taktzeitvorteile von Anlagen mit variablen Brennweiten von 7% gegenüber Anlagen mit festen Brennweiten ermittelt werden.

Die Berechnungsverfahren wurden im Kapitel 6 hinsichtlich ihres Nutzenpotentials für die industrielle Anwendung analysiert. Für ein Planungsszenario ergab die Taktzeiteinsparung gegenüber einer manuell programmierten Roboterbahn 22% (Festoptikkonzept) bzw. 27% (Konzept mit variabler Brennweite). Durch den Einsatz eines für die effiziente Bedienung entwickelten aufgabenorientierten Programmiersystems, welches die Berechnungsverfahren in heute übliche Modellierungsmechanismen einbindet, konnte zusätzlich die Programmierzeit um 50% verkürzt werden. Ähnliche Resultate zeigte die Verwendung der Algorithmen für die Programmierung einer Schweißanlage in einem zweiten Anwendungsbeispiel. Der Einspareffekt betrug dabei 17% bzw. 19%. In der Kombination des aufgabenorientierten Programmiersystems mit einem intuitiven Eingabesystem nach ZAEH & VOGL (2006) konnte für dieses Anwendungsbeispiel zudem eine Einsparung der Programmierzeit von ca. 70% realisiert werden. Eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit der entwickelten Optimierungssysteme im Kapitel 7 ergab eine Amortisationsdauer von weniger als einem Jahr.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die innerhalb dieser Arbeit vorgestellten Berechnungsmethoden dazu geeignet sind, die Produktivität von Remote-Laseranlagen durch die Berechnung von zeitoptimalen Bewegungen deutlich zu steigern. Für die relativ junge Technologie des RLS konnte somit ein erster Grundstein gelegt werden, die kinematische und aufgabenspezifische Redundanz effizient aufzulösen. Das vorgestellte Paradigma der aufgabenorientierten Programmierung von Robotersystemen bietet dabei den Rahmen, diese Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis zu überführen.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungsansätze stellen Lösungen für sehr spezielle Anlagentypen dar, die nicht ohne zusätzlichen Entwicklungsaufwand auf andere Systeme übertragbar sind. Dennoch kann die Idee bzw. Vorgehensweise, sowohl die anlagenspezifischen als auch die prozessspezifischen Freiheitsgrade für eine automatische Roboterbewegungsplanung zu nutzen, eine interessante Möglichkeit bieten, die Produktivität von Anlagen auch ganz anderer Art weiter zu verbessern. Anwendungsdomänen könnten beispielsweise das Widerstandspunktschweißen mit bewegter Elektrode beim Schweißvorgang (RoboSpin-Technologie, vgl. RIPPL (2007)) oder das Remote-Laserschneiden mit Scannern (siehe LUETKE (2008)) sein.

9 Literaturverzeichnis

APPLEGATE et al. 2006

Applegate, D.; Bixby, R.; Chvatal, V.; Cook, W.: The Travelling Salesman Problem: A Computational Study. Princeton, New Jersey: Princeton University Press 2006. ISBN: 0-6911-2993-2.

AZARM & SCHMIDT 1997

Azarm, K.; Schmidt, G.: A decentralized approach for the conflict-free motion of multiple mobile robots. *Advanced robotics: The International Journal of the Robotics Society of Japan*. 11 (1997) 4, S. 323.

BENNEWITZ & BURGARD 2000

Bennewitz, M.; Burgard, W.: An experimental comparison of path planning techniques for teams of mobile robots. In: Dillmann, R. et al. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 2000*. Karlsruhe: Springer 2000, S. 175-182. ISBN: 3-540-41214-10.

BENZ 1999

Benz, S.: *Bahnplanung redundanter Roboterkinematiken mit verteilten Simulationswerkzeugen*. Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-8265-6327-1.

BERNHARDT et al. 1997a

Bernhardt, R.; Schreck, G.; Willnow, C.: On realistic robot simulation. In: *European Simulation Multiconference (ESM)*. Istanbul, Türkei: 1997.

BERNHARDT et al. 1997b

Bernhardt, R.; Schreck, G.; Willnow, C.: *RRS-Interface specification. Version 1.3*. Berlin: Körperschaft Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) 1997.

BESKE 1992

Beske, E. U.: *Untersuchungen zum Schweißen mit Nd:YAG-Laserstrahlung*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3-1814-5702-7.

BOBROW 1988

Bobrow, J. E.: Optimal robot path planning using minimum-time criterion. *IEEE Journal of Robotics and Automation* 4 (1988) 4, S. 443-450.

BREUN & CALLIES 2006

Breun, S.; Callies, R.: Redundant optimal control of manipulators along specified paths. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Computational Mechanics: Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering*. Lissabon, Portugal: Mota Soares, C. 2006, S. 11-15.

CHAN & DUBEY 1995

Chan, T. F.; Dubey, R. V.: A weighted least norm solution based scheme for avoiding joint limits for redundant joint manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 11 (1995) 2, S. 286-292.

CHEN 1991

Chen, Y.: Solving robot trajectory planning problems with uniform cubic B-splines. *Optimal Control Applications and Methods* 12 (1991) 4, S. 247-262.

CHEVALLEREAU & DAYA 1994

Chevallereau, C.; Daya, B.: A new method for robot control in singular configurations with motion in any cartesian direction. In: *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Diego, CA, USA: 1994, S. 2692-2697.

CHIBISOV & MAYR 2007a

Chibisov, D.; Mayr, E.: Computing minimum-time motion for 6R robots and application to industrial welding. In: *Proceedings of the 4th International Workshop Computer Algebra Systems in Teaching and Research (CASTR 2007)*. Siedlce, Polen: 2007, S. 72-78.

CHIBISOV & MAYR 2007b

Chibisov, D.; Mayr, E.: Motion planning for 6R robots: multiple tasks with constrained velocity and orientation of the end-effector. In: *Proceedings of the 2007 International Workshop on Symbolic-Numeric Computation*. London, Ontario, Canada: 2007, S. 72-78.

CLEARY & TESAR 1990

Cleary, K.; Tesar, D.: Incorporating multiple criteria in the operation of redundant manipulators. In: *Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Tsukuba, Japan: 1990, S. 618-624.

CONKUR & BUCKINGHAM 1997

Conkur, E. S.; Buckingham, R.: Clarifying the definition of redundancy as used in robotics. *Robotica* 15 (1997) 5, S. 583-586.

CONSTANTINESCU 1998

Constantinescu, D.: Smooth time optimal trajectory planning for industrial manipulators. Master's Thesis, University of Brasov, Rumänien, 1998.

CONSTANTINESCU & CROFT 2000

Constantinescu, D.; Croft, E. A.: Smooth and time-optimal trajectory planning for industrial manipulators along specified paths. *Journal of Robotic Systems* 17 (2000) 5, S. 233-249.

CRAIG 1989

Craig, J. J.: *Introduction to robotics: mechanics and control*. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing 1989. ISBN: 0-201-09528-9.

CRAIG 2005

Craig, J. J.: *Introduction to robotics : mechanics and control*. Upper Saddle River, NJ: Pearson, Prentice Hall 2005. ISBN: 0-1312-3629-6.

DENAVIT & HARTENBERG 1955

Denavit, J.; Hartenberg, R.: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics* 23 (1955), S. 215-221.

DILTHEY 2005

Dilthey, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren: Band 1: Schweiß- und Schneidtechnologien*. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-5402-1673-1.

DIN 8593-6 1985

DIN 8593-6: Teil 6: Fertigungsverfahren Fügen; Fügen durch Schweißen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 1985.

DIN EN ISO 8373 1994

DIN EN ISO 8373: *Industrieroboter Wörterbuch*. Berlin: Beuth 1994.

DIN EN ISO 11145 2006

DIN EN ISO 11145: *Optik und Photonik - Laser und Laseranlagen - Begriffe und Formelzeichen*. Berlin: Beuth 2006.

EICHLER et al. 2004

Eichler, J.; Dünkel, L.; Eppich, B.: Die Strahlqualität von Lasern. *Laser Technik Journal* 1 (2004) 2, S. 63-66.

EMMELMANN 1999

Emmelmann, C.: Status und Zukunft für das Laserfügen im Automobilbau. In: *Automotive Circle International Conference, Fügen und Verbinden im Automobilbau*. Bad Nauheim: 1999, S. 87-116.

EMMELMANN 2005

Emmelmann, C.: Laser Remote Welding - Status and Potential for Innovations in Industrial Production. In: *3rd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM)*. München: 2005.

EPPINGER & KREUZER 1989

Eppinger, M.; Kreuzer, E.: Systematischer Vergleich von Verfahren zur Rückwärts-transformation bei Industrierobotern. *Robotersysteme* 5 (1989) 4, S. 219-228.

FURUSHO & ONISHI 1985

Furusho, J.; Onishi, S.: An efficient approach for solving the inverse kinematics of manipulators. In: *15th International Symposium on Industrial Robots*. Tokyo, Japan: 1985, S. 1051-1058.

GOLUB & VAN LOAN 1983

Golub, G. H.; Van Loan, C. F.: *Matrix computations*. Baltimore: Johns Hopkins University Press 1983. ISBN: 0-8018-3010-9.

GOMBERT et al. 1995

Gombert, B.; Hirzinger, G.; Plank, G.; Schedl, M.; Shi, J.: Modular concepts for the new generation of DLR's light weight robots. In: Proceedings of the Third Conference on Mechatronics and Robotics. Paderborn: 1995, S. 30-43.

GRUPP et al. 2003

Grupp, M.; Seefeld, T.; Vollersten, F.: Laser Beam Welding with Scanner. In: Proceedings of the Second International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM). München: 2003.

HAMMER & BROCKMANN 2006

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

HARTLEY & ZISSERMAN 2003

Hartley, R.; Zisserman, A.: Multiple view geometry in computer vision. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press 2003. ISBN: 0-5215-4051-8.

HEINZINGER et al. 1990

Heinzinger, G.; Jacobs, P.; Canny, J.; Paden, B.: Time-optimal trajectories for a robot manipulator: a provably good approximation algorithm. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Cincinnati, Ohio, USA: 1990.

HERING & MARTIN 2006

Hering, E.; Martin, R.: Photonik. Grundlagen, Technologie und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 13 978-3-540-23438-8.

HIRZINGER et al. 2001

Hirzinger, G.; Albu-Schäffer, A.; Hähle, M.; Schaefer, I.; Sporer, N.: On a new generation of torque controlled light-weight robots. In: IEEE International Conference of Robotics and Automation. Seoul, Korea: 2001, S. 3356-3363.

HOLLERBACH & SUH 1985

Hollerbach, J. M.; Suh, K. C.: Redundancy resolution of manipulators through torque optimization. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Silver Spring, MD, USA: 1985, S. 1016-1021.

HORNIG 2002

Hornig, H.: Mit dem Laser sauber gefügt bei der BMW Group. Blech in Form (2002) 3, S. 34-37.

HÜGEL 1992

Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser : Eine Einführung. Stuttgart: Teubner 1992. ISBN: 3-5190-6134-1.

HWANG & AHUJA 1992

Hwang, Y. K.; Ahuja, N.: Gross motion planning - a survey. ACM Computing Surveys 24 (1992) 3, S. 219-291.

ICHBIAH 2005

Ichbiah, D.: Roboter. Geschichte - Technik - Entwicklung. München: Knesebeck 2005. ISBN: 3896602764.

IVLEV & GRÄSER 1997

Ivlev, O.; Gräser, A.: An analytical method for the inverse kinematics of redundant robots. In: Third ECPD International Conference on advanced Robots, Intelligent Automation and Active Systems. Bremen: 1997, S. 416-421.

JACOB 2004

Jacob, D.: Roboter in der Automobilindustrie. In: 4. Münchner Wissenschaftstage im "Jahr der Technik". München: 2004.

KAUSCHKE 1996

Kauschke, M.: Closed form solutions applied to redundant serial link manipulators. Mathematics and Computers in Simulation 41 (1996) 5-6, S. 509-516.

KIM et al. 1994

Kim, S.; Park, K.; Lee, J.: Redundancy resolution of robot manipulators using optimal kinematic control. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, CA, USA: 1994, S. 683-688.

KIRCHHOFF & EMMELMANN 2007

Kirchhoff, M.; Emmelmann, C.: Design of a solid state laser remote system of high economic efficiency and of high flexibility for multiple applications. In: Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM) 2007. München: 2007, S. 437-441.

KLING 2004

Kling, R.: Abschlussbericht zum BMBF-Projekt Prozesssicheres Remoteschweißen für flexible Fertigungskonzepte (Profi). Garbsen: Verlag PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2004.

KRASTEL 2002

Krastel, K.: Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen. München: Utz 2002. ISBN: 3-8316-0176-3.

KRAUS 2005

Kraus, W.: Wachstum und Arbeit durch technologische Innovation. Neuer Glanz für "Made in Germany". Laser Technik Journal 2 (2005) 4, S. 25.

KRÖGER et al. 2006

Kröger, T.; Tomiczek, A.; Wahl, F. M.: Towards on-line trajectory computation. In: Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: 2006, S. 736-741.

KYRIAKOPOULOS & SARIDIS 1988

Kyriakopoulos, K.; Saridis, G.: Minimum jerk path generation. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Philadelphia, Pennsylvania, USA: 1988, S. 364-369.

KYRIAKOPOULOS & SARIDIS 1994

Kyriakopoulos, K.; Saridis, G.: Minimum jerk for trajectory planning and control. *Robotica* 12 (1994) 2, S. 109-113.

LATOMBE 1991

Latombe, J.-C.: Robot motion planning. Boston: Kluwer Academic Publishers 1991. ISBN: 0-7923-9129-2.

LEE 1992

Lee, A. Y.: Solving constrained minimum-time robot problems using the sequential gradient restoration algorithm. *Optimal Control Applications and Methods* 13 (1992) 2, S. 145-154.

LEE et al. 1986

Lee, C. S.; Gonzalez, R. C.; Fu, K. S.: Tutorial on Robotics. Washington, D.C: IEEE Computer Society Press 1986. ISBN: 0-8186-0658-4.

LEROY et al. 2002

Leroy, S.; Laumond, J. P.; Simeon, T.: Path coordination for multiple mobile robots: a resolution-complete algorithm. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18 (2002) 1, S. 42-49.

LIEGEOIS 1977

Liegeois, A.: Automatic supervisory control of the configuration and behaviour of multibody mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 7 (1977) 2, S. 868-871.

LIN & KERNIGHAN 1970

Lin, S.; Kernighan, B. W.: An effective heuristic procedure for partitioning graphs. *The Bell System Technical Journal* 49 (1970) 2, S. 291-307.

LINGER 2004

Linger, M.: Großfeld-Laser Remote Schweißtechnik und deren industrielle Anwendungen. In: 1. VDI-Laserforum: Laser-Remote-Schweißen. Hamburg: 2004.

LLOYD & HAYWARD 1988

Lloyd, J.; Hayward, V.: Kinematics of common industrial robots. *Robotics* 4 (1988) 2, S. 169-191.

LLOYD 1995

Lloyd, J.: Robot trajectory generation for paths with kinematic singularities. Dissertation, McGill University, Montreal, Kanada, 1995.

LUETKE 2008

Luetke, M.: Aus der Faser in die Ferne. Laser-Remote-Schneiden mit dem Faserlaser. Photonik 40 (2008) 1, S. 12.

MARKUS 2001

Markus, B.: Globale Bahnplanung zur Optimierung der Bewegung von kinematisch redundanten Handhabungssystemen. Düsseldorf: VDI Verlag 2001. ISBN: 3-1838-7108-4.

MAYER 2007

Mayer, A.: Strong market growth in 2006 - world market for laser systems reaches new record high. Laser Technik Journal 4 (2007) 4, S. 11.

MILENKOVIC & HUANG 1984

Milenkovic, V.; Huang, B.: Kinematics of minor robot linkage. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers 1984.

MOLL & KAVRAKI 2004

Moll, M. M.; Kavraki, L.: Path planning for minimal energy curves of constant length. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, D.C.: 2004, S. 2826-2831. ISBN: 1050-4729.

MUENCH 1991

Muench, H.: Bewegungssynthese zur Steuerung redundanter und kooperierender Kinematiken. München, Wien: Hanser 1991.

OEFELE et al. 2008

Oefele, F.; Musiol, J.; Zaeh, M. F.: Influence of remote-laser-welding parameters for an 8kW fibre laser on seam quality of steels. In: 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, ICALEO. Temecula, CA, USA: 2008, S. 399-405.

OJDANIC et al. 2006

Ojdanic, D.; Ivlev, O.; Gräser, A.: A new fast motion planning approach for dexterous manipulators in 3D-cartesian space. In: Proceedings of the 37th International Symposium on Robotics (ISR 2006). München: 2006, S. 49-50.

OTTO & HOHENSTEIN 2007

Otto, A.; Hohenstein, R.: Laserstrahlschweißen - Trends und aktuelle Entwicklungen. Die wichtigste industrielle Laseranwendung im Überblick. Laser Technik Journal 4 (2007) 4, S. 27-31.

PAUL 1984

Paul, R. P.: Robot manipulators. Mathematics, programming, and control. The computer control of robot manipulators. Cambridge Mass.: MIT Press 1984. ISBN: 0-2621-6082-X.

PAURA 2005

Paura, R.: Short Course Session #4: Remote Laser Welding (Principles & Applications). In: 24th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO. Miami, Florida (USA): 2005.

PFALZGRAF 1997

Pfalzgraf, J.: On geometric and topological reasoning in robotics. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 19 (1997) 3-4, S. 279-318.

PFEIFFER & REITHMEIER 1987

Pfeiffer, F.; Reithmeier, E.: *Roboterdynamik: Eine Einführung in die Grundlagen und technischen Anwendungen*. Stuttgart: Teubner 1987. ISBN: 3-5190-2077-7.

PIEPER & ROTH 1969

Pieper, D. L.; Roth, B.: The kinematics of manipulators under computer control. In: 2nd International Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. Zakopane, Polen: 1969, S. 159-169.

POHL & LIPKIN 1991

Pohl, E. D.; Lipkin, H.: A new method of robotic motion control near singularities. In: Fifth International Conference on Advanced Robotics (91 ICAR). Pisa, Italien: 1991, S. 405-410.

POPRAWA 2005

Poprawa, R.: *Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin, Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 3-5402-1406-2.

RAJAN 1985

Rajan, V. T.: Minimum-time trajectory planning. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis, Montana, USA: 1985, S. 759-764.

REFA 1985

REFA: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums: Teil 3 Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung*. In: Verband für Arbeitsgestaltung und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.). München: Hanser 1985. ISBN: 3-4461-4236-3.

REINHART et al. 2007

Reinhart, G.; Vogl, W.; Kresse, I.: A projection-based user interface for industrial robots. In: IEEE Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS 2007). Bari, Italien: 2007, S. 67-71.

REINHART et al. 2008

Reinhart, G.; Munzert, U.; Vogl, W.: A programming system for robot-based remote-laser-welding with conventional optics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 1, S. 37-40.

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. Bremen: 2006, S. 93-101.

RIPPL 2007

Rippl, P.: RoboSpin - eine neue Verfahrenstechnik beim Widerstandspunktschweißen durch Elektrodendrehung mittels Industrieroboter zur Taktzeitverkürzung und Qualitätsverbesserung. DVS-Berichte. 244 (2007), S. 37.

RIPPL 2008

Rippl, P.: Remote-Zoomoptik am Industrieroboter und ausgewählte Anwendungen. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium, Innovationen für die Produktion. München: Utz 2008, S. 338-348. ISBN: 978-3-8316-0844-7.

ROTH et al. 1973

Roth, B.; Rastegar, J.; Scheinman, V.: On the design of computer controlled manipulators. In: First CISM-IFTMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Udine, Italien: 1973, S. 93-113.

RÜCKEL 2006

Rückel, V.: Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung für kooperierende Industrieroboter. Bamberg: Meisenbach 2006. ISBN: 3-8752-5250-0.

RUEHL & ROTH 2006

Ruehl, M.; Roth, H.: Path planning and visualisation in high dimensional configuration space. In: Proceedings of the 37th International Symposium on Robotics (ISR 2006). München: 2006.

RUß 2004

Ruß, A.: Schweißen mit dem Scheibenlaser - Potentiale der guten Fokussierbarkeit. München: Utz 2004. ISBN: 3-8316-0580-7.

SAHAR & HOLLERBACH 1985

Sahar, G.; Hollerbach, J. M.: Planning of minimum-time trajectories for robot arms. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis, Montana, USA: 1985, S. 751-758.

SANCHEZ & LATOMBE 2002

Sanchez, G.; Latombe, J.-C.: On delaying collision checking in PRM Planning - Applications to multi-robot coordination. International Journal of Robotics Research 21 (2002) 1, S. 5-26.

SCHMITZ 2004

Schmitz, M.: Innovationsförderung in den Optischen Technologien. Eine Chance für die deutsche Wirtschaft. Laser Technik Journal 1 (2004) 1, S. 31-34.

SCHREIBER 2004

Schreiber, G.: Steuerung für redundante Robotersysteme: Benutzer- und aufgabenorientierte Verwendung der Redundanz. Dissertation Universität Stuttgart 2004.
<<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2186/pdf/schreiberDiss.pdf>> (Stand 01/2009). 2004.

SHILLER 1994

Shiller, Z.: Time-energy optimal control of articulated systems with geometric path constraints. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, Californien, USA: 1994, S. 2680-2685.

SIMON 1993

Simon, D.: The application of neural networks to optimal robot trajectory planning. Robotics and Autonomous Systems 11 (1993) 1, S. 23-34.

STEMMANN & EMMELMANN 2005

Stemmann, J.; Emmelmann, C.: High performance scanner for remote welding with Nd:YAG lasers. In: Proceedings of the 24th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Miami, USA: 2005, S. 965-972.

SUGIHARA & SMITH 1999

Sugihara, K.; Smith, J.: Genetic algorithms for adaptive planning of path and trajectory of a mobile robot in 2D terrains. IEICE Transactions on Information and Systems. 82 (1999) 1, S. 309-317.

THOMY et al. 2004

Thomy, C.; Grupp, M.; Seefeld, T.; Sepold, G.; Vollersten, F.: CO₂- Laser-Remoteschweißen. Grundlagen, Prozessuntersuchungen und Anwendungen. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 7/8, S. 373-378.

THUMM 2005

Thumm, C.: Wirtschaftliches Laserschweißen von Blechteilen mit YAG-Lasern. In: Dausinger, F. et al. (Hrsg.): Stuttgarter Lasertage '05. Stuttgart: 2005, S. 93-96.

TSAI & MORGAN 1985

Tsai, L.; Morgan, A.: Solving the kinematics of the most general six- and five-degree-of-freedom manipulators by continuation methods. Transactions of the ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design 107 (1985), S. 189-200.

TSOUKANTAS & CHRYSOLOURIS 2006

Tsoukantas, G.; Chryssolouris, G.: Theoretical and experimental analysis of the remote welding process on thin, lap-joined AISI 304 sheets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 35 (2006) 9-10, S. 880-894.

ULLRICH 1987

Ullrich, R.: Robots and Lasers / Robots versus Lasers: An Introduction. In: Belforte, D. (Hrsg.): Second International Conference Combining Laser and Robot Technologies. Michigan, USA: 1987.

VOGL 2005

Vogl, W.: Verfahren und Vorrichtung zum Einrichten einer Bahnkurve einer Roboter-
vorrichtung (20.12.2005). DPMA. Pr.: DE102005060967B4.

VON STRYK & SCHLEMMER 1992

von Stryk, O.; Schlemmer, M.: Optimal control of the industrial robot manutec r3. In:
Bulirsch, R. et al. (Hrsg.): Computational Optimal Control, International Series of
Numerical Mathematics 115. Basel: Birkhäuser 1992, S. 367-382.

WANG & HAMAM 1992

Wang, D.; Hamam, Y.: Optimal trajectory planning of manipulators with collision
detection and avoidance. The International Journal of Robotics Research 11 (1992) 5,
S. 460-468.

WAPENHANS et al. 1994

Wapenhans, H.; Hölzl, J.; Steinle, J.; Pfeiffer, F.: Optimal trajectory planning with
application to industrial robots. International Journal of Advanced Manufacturing
Technology 9 (1994) 1, S. 49-55.

WECK & BRECHER 2005

Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbe-
reiche. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-5402-2504-8.

WEDEL & NIEDRIG 2006

Wedel, B.; Niedrig, R.: Anforderungen an die Laserbearbeitungsköpfe beim Schwei-
ßen mit hoher Strahlqualität. In: 5. Laser-Anwenderforum. Bremen: 2006, S. 51-60.

WEDEL 2007

Wedel, B.: Focusing high brightness lasers - Special requirements on laser processing
heads. In: Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in
Manufacturing 2007. München: 2007, S. 325-327.

WESTKÄMPER & WARNECKE 2006

Westkämper, E.; Warnecke, H. J.: Einführung in die Fertigungstechnik. Wiesbaden:
Teubner 2006. ISBN: 3-8351-0110-2.

WOERNLE 1987

Woernle, C.: Ein systematisches Verfahren zur Rückwärtstransformation bei Indust-
rierobotern. Robotersysteme 3 (1987), S. 219-228.

YE & BORENSTEIN 2004

Ye, C.; Borenstein, J.: A method for mobile robot navigation on rough terrain. IEEE
International Conference on Robotics and Automation 4 (2004), S. 3863-3869.

YOSHIKAWA 1990

Yoshikawa, T.: Foundation of Robotics. Cambridge, Massachusetts: MIT Press 1990.

ZAEH et al. 2005

Zaeh, M. F.; Papadakis, L.; Roeren, S.; Eireiner, D.: Application of thermo-mechanical models to predict the distortion of component parts during welding processes by means of finite element analysis (FEA). In: 2nd German - Israeli Symposium for Design and Manufacturing "Advances in Methods and Systems for Products and Processes". Berlin: 2005, S. 109-117.

ZAEH et al. 2006a

Zaeh, M. F.; Munzert, U.; Oefele, F.: Offline concept for optimization of robot paths for remote laser welding without scanners. In: 10th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology". Barcelona, Spanien: 2006, S. 601-604.

ZAEH & VOGL 2006

Zaeh, M. F.; Vogl, W.: Interactive laser projection for programming industrial robots. In: 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Santa Barbara, CA / USA, 22.-25.10.2006. 2006, S. 125-128.

ZAEH et al. 2006b

Zaeh, M. F.; Vogl, W.; Patron, C.: Interaktive Laserprojektion zur Programmierung von Industrierobotern. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 31.05-01.06.2006. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2006, S. 241-254.

ZAEH et al. 2007

Zaeh, M. F.; Munzert, U.; Oefele, F.: Robot based remote-laser-welding without scanner optics. In: Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2007. München: 2007, S. 429-436.

ZAEH et al. 2008

Zaeh, M. F.; Schober, A.; Papadakis, L.: Sensitivity analysis of welding heat effects by varying modelling parameters. In: International Workshop on Thermal Forming and Welding Distortion. Bremen: 2008, S. 97-108.

ZHOU & NGUYEN 1997a

Zhou, Z. L.; Nguyen, C. C.: Globally optimal trajectory planning for redundant manipulators using state space augmentation method. Journal of Intelligent and Robotic Systems 19 (1997) 1, S. 105-117.

ZHOU & NGUYEN 1997b

Zhou, Z. L.; Nguyen, C. C.: Joint configuration conservation and joint limit avoidance of redundant manipulators. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, New Mexico, USA: 1997, S. 2421-2426.

ZIMMERMANN & SONNER 2008

Zimmermann, U.; Sonner, C.: Bahnplanung und -ausführung beim robotergeführten Remote-Laserschweißen. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium, Innovationen für die Produktion. München: Utz 2008, S. 325-336.

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderdierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klippsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Saverer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrtbe, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozesskommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuzcek, H.*
Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54078-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkaskens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bamm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56689-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationwerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanner, N.*
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionssystemen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rackland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kähler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozess mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Präzeorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgleitetete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

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@utz.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 ins 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 Dichtungs montage 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 Mikrobautteilen**
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 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturndynamik 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 Kapselfel 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 · Schlank 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

Forschungsberichte iw b

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

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer
Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
 2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
 2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
 2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
 2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen
 2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
 2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
 2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
 2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
 2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
 2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
 2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
 2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
 2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
 2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
 2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
 2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
 2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
 2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
 2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert
Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlsschweißen
 2010 · 176 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Völlner
Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
 2010 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0955-0
- 236 Nils Müller
Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
 2010 · 270 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0992-5
- 237 Franz Decker
Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
 2010 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0996-3

