

121

Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Technologieorientierte 3D-Lasermikrobearbeitung

Lars Pursche

121

Pursche

Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung

ISSN 1431-6226
ISBN 3-87525-183-0



Lars Pursche

*Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung*

Lars Pursche

*Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung*

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungstechnologie

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger

LFT



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 26. November 2001
Tag der Promotion: 20. Dezember 2001
Dekan: Prof. Dr.-Ing. A. Winnacker
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger
Prof. Dr.-Ing. L. Cser, Bay Zoltán Stiftung Budapest, Ungarn

ISBN 3-87525-183-0
ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2002
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Wesentliche Aspekte der Arbeit wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Verbundvorhabens „Neue Materialien und Verfahren für 3-D MID“ erarbeitet.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr. h. c. M. Geiger, Ordinarius des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, danke ich herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen, das er bei der Vergabe der Arbeit in mich setzte, die persönliche Förderung sowie die fachliche Unterstützung, die ganz entscheidend zum erfolgreichen Abschluß meiner Arbeit beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. L. Cser, vom Bay Zoltán Institut für Logistik und Produktionssysteme, danke ich für die spontane Bereitschaft zur Übernahme des Korreferates sowie die eingehende Durchsicht der Dissertation.

Bedanken möchte ich mich ferner bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere bei den Mitgliedern der Forschungsgruppe Planung und Produktentwicklung. Meinem Freund, Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Frank Backes, danke ich für seine Hilfsbereitschaft, die zahlreichen Diskussionen und die intensive Durchsicht der Dissertation. Herr Dr.-Ing. Jürgen Knoblach, Herr Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah und Herr Dipl.-Ing. Andreas Kach haben mit ihren Anregungen und Hinweisen zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich stets nach besten Kräften unterstützt haben sowie meiner Ehefrau Pouran, für ihr Verständnis und ihre Geduld – vor allem in der Endphase der Arbeit.

Meerbusch, im Dezember 2001

Lars Pursche

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen.....	9
1 Einleitung	13
2 Stand der Forschung und Technik	15
2.1 Verfahren und Einsatzgebiete der Lasermikrobearbeitung	15
2.2 Laseranlagen für die räumliche Mikrobearbeitung.....	18
2.2.1 Laserstrahlquellen	18
2.2.2 Laserstrahlführung und -formung	19
2.2.3 Anlagenkinematiken.....	23
2.2.4 Anlagensteuerungen	24
2.2.5 Beispiele von Anlagensystemen für die 3D-Lasermikrobearbeitung.....	25
2.3 Programmierverfahren.....	28
2.3.1 Online-Programmierverfahren	28
2.3.2 Offline-Programmierverfahren.....	29
2.4 Anlagenprogrammierung für die 3D-Mikrobearbeitung	31
2.4.1 Probleme und Randbedingungen.....	31
2.4.2 Aufgaben der Bearbeitungsplanung	33
2.4.3 Derzeitige Methoden.....	35
2.5 Zusammenfassung.....	38
3 Zielsetzung	39
4 Gesamtkonzept der Bearbeitungsplanung	41
4.1 Aufgaben und Anforderungsprofil	41

4.2 Modelle und Methoden	42
4.2.1 Datenmodelle und Modellierung.....	42
4.2.2 Bearbeitungsplanung und Programmgenerierung	43
4.2.3 Simulation und Kollisionskontrolle.....	44
4.3 Informationstechnische Integration	45
5 Datenmodelle der Bearbeitungsplanung	49
5.1 Werkstückmodellierung	49
5.1.1 Geometrieablage	49
5.1.2 Ablage der Bearbeitungskonturen	50
5.1.3 Technologieanbindung	51
5.1.4 Geometrieimport	52
5.2 Anlagenmodellierung	53
5.2.1 Anlagengeometrie	53
5.2.2 Kinematikmodellierung.....	54
5.2.3 Modellierung der Scansysteme	55
5.2.4 Modellierung der Handhabungskinetik	59
5.3 Bearbeitungsmodellierung.....	63
5.3.1 Aufbau des Bearbeitungsmodells.....	63
5.3.2 Modellierung der Laserbearbeitungsbahnen	63
5.3.3 Technologieanbindung	65
6 Methoden der Bearbeitungsplanung	67
6.1 Analyse der Bearbeitungsaufgabe	67
6.2 Optimierungsverfahren und Komplexitätsbetrachtungen	68
6.3 Entwicklung einer hierarchischen Lösung	71
6.4 Generierung einer Anfangsmenge von Vorzugslagen.....	75
6.4.1 Bestimmung einer oberen und unteren Schranke.....	76
6.4.2 Berechnung einer unteren Schranke von Vorzugslagen.....	76
6.4.3 Ablage und Berechnung von Vorzugslagen	77
6.5 Metaheuristik für die Vorzugslagenoptimierung.....	80
6.5.1 Lösungsansatz	80
6.5.2 Aufbau der Metaheuristik.....	81
6.5.3 Erzeugung einer Startmenge für die untergeordnete Heuristik	82
6.5.4 Untergeordnete Optimierungsheuristik	82

6.5.5	Übergeordnete Optimierungsheuristik	86
6.6	Verfahrwegminimierung zwischen Vorzugslagen	89
6.7	Verfahrwegminimierung innerhalb von Vorzugslagen	92
6.8	Programmgenerierung	93
7	Realisierung des Planungssystems	95
7.1	Systemaufbau und –integration	95
7.2	Planungsbeispiel	97
8	Zusammenfassung	103
	Literaturverzeichnis	105

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AABB	Axis aligned bounding box
API	Application Procedural Interface
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
B-Rep	Boundary Representation, Flächenbegrenzungsmodell
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
DIN	Deutsches Institut für Normung
HPGL	Hewlett Packard Graphical Language
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
MID	Molded Interconnect Device
NC	Numerical Control
OBB	Oriented bounding box
RC	Robot Control
RID	Rechnerinterne Darstellung
SMD	Surface mounted device
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TCP	Tool Center Point
UV	Ultraviolett
VDAFS	Verband der deutschen Automobilindustrie – Flächenschnittstelle
VDI	Verein deutscher Ingenieure

Symbol	Beschreibung
a	Austrittspunkt des Laserstrahls aus dem Scankopf
a_i	Längen des Hüllquaders in Richtung der Einheitsvektoren
A_i	Einheitsvektoren des Hüllquaderkoordinatensystems
b_{ij}	Element einer Kostenmatrix
β	Anstellwinkel des Laserstrahls
B	Kostenmatrix
E	Energiezustand
f	Brennweite
γ	Anstellwinkel des Laserstrahls
h_1	Abstand Galvospiegel und F-Theta-Objektiv
h_2	Abstand Austrittsebene des Objektivs und Projektionsebene
H_0	Koordinatensystem des Dreh-/Schwenkteller
φ	Einfallswinkel des Laserstrahls auf Projektionsebene
k	Boltzmann-Konstante
m	Anzahl der Vorzugslagen
m_k	Bewertungsvektor
M	Mittelpunkt des Hüllquaders
M_{ges}	Gesamttransformationsmatrix
n	Anzahl der Laserbahnen
O	Komplexitätsmaß
P	Position des Endeffektors (TCP)
$P(E)$	Boltzmann-Wahrscheinlichkeit
r	Orientierungsvektor der Laserstrahlachse
r_F	Fokusradius
R_{ges}	Gesamtrotationsmatrix
R_{HHS}	Rotationsmatrix für Handhabungssystem
R_x, R_y, R_z	Rotationsmatrix einer Drehung um die x-, y- oder z-Achse
S_0	Koordinatensystem des Scansystems
SF	Zweifacher Abstand des Fokus vom Mittelpunkt

θ	Einfallswinkel
T	Temperatur
v	Verschiebevektor
X	Menge aller Ortsvektoren der Laserbahnen
$z_{R,F}$	Rayleigh-Länge

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik strebt die Integration elektronischer, mechanischer und optischer Funktionen in Mikrokomponenten und Bauelementen an. Die Bedeutung dieser Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts wird durch die ständige Forderung nach stärkerer Miniaturisierung und höheren Integrationsdichten in nahezu allen Produktionsbereichen deutlich [1-3]. Vor allem in den dynamischen Bereichen, wie etwa der Telekommunikation, gilt sogar der jeweilige Grad der Miniaturisierung als ein Maßstab für den technologischen Stand eines Produktes.

Als Konsequenz dieser fortschreitenden Entwicklung sind die Unternehmen gezwungen, die Bauteile kompakter zu gestalten und die vorhandenen Freiräume, wie die der räumlichen Anordnung der Komponenten, immer weiter auszunutzen, um mehr Funktionalität integrieren zu können. Allerdings stellt dieses Vorgehen hohe Anforderungen an die Verfahren zur Komponenten- und Bauteilfertigung. Insbesondere die konventionellen Produktionstechnologien werden durch die Forderung einer räumlichen Bearbeitung an ihre Verfahrensgrenzen geführt, so daß die Bedeutung von flexiblen und gleichzeitig hochpräzisen Mikrofertigungsverfahren besonders deutlich zum Tragen kommt.

Gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren kann sich der Laser als Werkzeug für die Mikromaterialbearbeitung in vielen Bereichen immer mehr durchsetzen [4-6]. Die Motive für seinen zunehmenden Einsatz liegen in seiner Ortsauflösung durch Fokussierbarkeit auf wenige Mikrometer sowie in der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit und -flexibilität. Während die zweidimensionale Bearbeitung bereits ein beträchtliches Marktsegment gewonnen hat, wurden in der industriellen Praxis die Wettbewerbsvorteile der 3D-Lasermikrobearbeitung bisher nicht genutzt.

Probleme bereitet den Unternehmen vor allem die Integration der 3D-Lasermikrobearbeitung in die Prozeßkette. Dies ist unmittelbar auf die höheren Anforderungen an die Anlagenprogrammierung zurückzuführen, die sich bei der räumlichen Mikrobearbeitung ergeben. Vor allem die konturbasierten Laserstrahl-Mikroverfahren können, aufgrund der komplexen räumlichen Bearbeitungskonturen, die in kleinsten Dimensionen auf Freiformflächen programmiert werden müssen, durch die Genauigkeitsanforderungen im Mikrobereich sowie durch die geringe Prozeßeinsicht des Bedieners, nicht mehr manuell programmiert werden. Für einen generellen Einsatz dieser Technologie ist es notwendig, die Programmierung rechnergestützt durchzuführen. Allerdings findet diese Problemstellung im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung bisher keine ausreichende Beachtung.

Eine Verbesserung der derzeitigen Situation kann nur erreicht werden, wenn die komplexen Bearbeitungsvorgänge bei der räumlichen Lasermikrobearbeitung rechnerunterstützt geplant und umgesetzt werden. Erst durch den durchgängigen

Rechnereinsatz entlang der Prozeßkette Planung, Gestaltung und Herstellung können die vorhandenen Miniaturisierungs- und Produktivitätspotentiale dieser Technologie ausgeschöpft werden. Ein nicht minder wichtiger Vorteil ist die gleichzeitig damit verbundene Unterstützung für die Prototypen- und Kleinserienfertigung. Durch den aktuellen Trend zu immer kürzeren Entwicklungs- und Markteinführungszeiten neuer Produkte nimmt der Bedarf an schnell realisierbaren, funktionellen Prototypen stetig zu. Mit der rechnergestützten Anlagenprogrammierung können die sich häufig ändernden Bearbeitungskonturen effizient auch für kleine Losgrößen programmiert werden.

Ziel der Arbeiten im Bereich der Lasermikrobearbeitung muß es demnach sein, die vorhandene Automatisierungslücke zu schließen und eine an der Prozeßkette orientierte Integration der Bearbeitungsplanung in den Fertigungsprozeß zu erreichen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher erstmals Methoden für die Bearbeitungsplanung im Bereich der dreidimensionalen Lasermikrobearbeitung entwickelt, die als Grundlage eines Planungssystems für die Anlagenprogrammierung dienen. Von der Erstellung eines Planungssystems als integraler Bestandteil der Prozeßkette ist ein vermehrter wirtschaftlicher Nutzen und insbesondere eine weitere Verbreitung der Lasermikrotechnologie zu erwarten.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Verfahren und Einsatzgebiete der Lasermikrobearbeitung

Im Bereich der Mikrobearbeitung hat der Laser bereits in großem Maße zur Miniaturisierung und zur Erhöhung der Integrationsdichte und somit zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Produkten beigetragen. Ausschlaggebend hierfür sind seine Eigenschaften, wie hohe Ortsauflösung und die exakte Steuerbarkeit der Energiedisposition sowie die Bearbeitungsgeschwindigkeit und -flexibilität, die nur durch die optische Zugänglichkeit beschränkt wird. Mit diesen Eigenschaften stellt der Laser eine wichtige wirtschaftliche Alternative gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren dar. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, daß der Laser heute mit Erfolg in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen, von der Feinwerktechnik, Medizintechnik über die Kommunikations- und Automobilelektronik bis zur Mikrosystemtechnik eingesetzt wird und mittlerweile einen hohen strategischen Stellenwert erlangt hat [7-9].

Der Markt für die Lasermikrobearbeitung wächst aufgrund des stetig steigenden Trends zur Miniaturisierung weiter, da die Neu- bzw. Weiterentwicklungen von Produkten durch eine zunehmende Miniaturisierung gekennzeichnet sind und der Laser auch zukünftigen Anforderungen in diesen dynamischen und hochinnovativen Branchen gerecht wird. Dieser Trend spiegelt sich auch in den Marktprognosen der nächsten Jahre wieder. Hier wird mit einem starken Wachstum der Lasermikrobearbeitung gerechnet. So belief sich in Europa das Marktvolumen für Lasersysteme zur Materialbearbeitung im Jahr 1999 auf 1,2 Mrd. Euro.

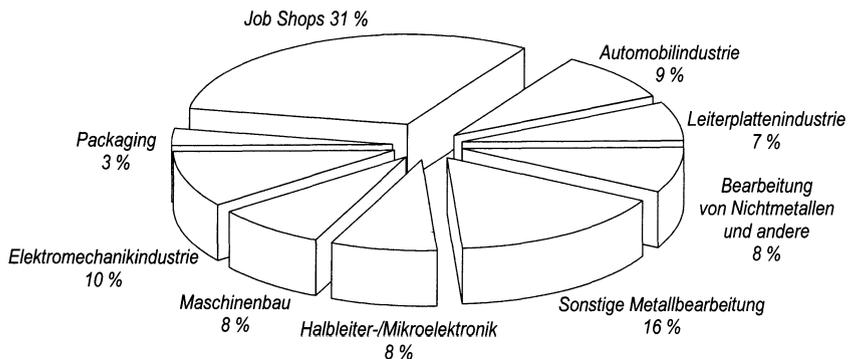


Bild 1: Europäischer Markt für Lasersysteme zur Lasermaterialbearbeitung nach Anwendersektoren [10]

Davon entfielen 18 % oder rund 150 Mill. Euro auf Mikrobearbeitungssysteme für die Bereiche Elektronik und Mikroelektronik (Bild 1). Für das Jahr 2010 wird allein hier ein Markt von gut einer Milliarde Euro erwartet, wobei Lasersysteme für Anwendungen des Laserstrahl-Mikroschneidens, -schweißen und -beschriftens darin noch nicht enthalten sind. Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von rund 15 %. Die hohen Wachstumswerte sind auf die steigende Durchdringung des Marktes zurückzuführen. Dabei ist ein Ende des Wachstumstrends in den Bereichen Mikrolöten, -schweißen, -schneiden, -bohren und -strukturieren noch nicht abzusehen [10].

Das Laserstrahl-Mikrolöten wird vorzugsweise bei einer geringen thermischen Beständigkeit der Bauelemente oder des Substratwerkstoffes eingesetzt, wenn Massenlötverfahren nicht verwendet werden können. Im Vergleich zu anderen Selektivlötverfahren werden die Bauteile nur geringfügig erwärmt, da es durch eine schnelle und präzise Leistungssteuerung ein lokales Aufheizen des Lotes an der Verbindungsstelle ermöglicht [11]. Im Gegensatz zu konventionellen Mikroschweißverfahren zeichnet sich das Laserstrahl-Mikroschweißen durch eine Reihe von Vorteilen aus, die mit keinem anderen Verfahren erzielt werden können. In Verbindung mit seiner Flexibilität ermöglicht der Laser die Bearbeitung von Mikroschweißnähten bei schwer oder sonst nicht zugänglichen Stellen bei einem großen Spektrum an Fügepartnermaterialien und -geometrien [12-15]. Die berührungslose Bearbeitung ermöglicht das Fügen auch sehr filigraner Bauteile, wie sie mit konventionellen Verfahren praktisch nicht mehr zu fertigen sind. Für das Laserstrahl-Mikroschneiden sind keine werkstückspezifischen Werkzeuge notwendig, da sich die Bearbeitungskonturen rein programmgesteuert bestimmen. Durch diese Verfahrensflexibilität kann das oft langwierige Anfertigen teurer Stanzwerkzeuge entfallen, da die Änderungen der Schneidkonturen unmittelbar umgesetzt werden können. Daher bietet sich dieses Verfahren insbesondere bei Anwendungen an, in denen das zu fertigende Teilespektrum eine große Typenvielfalt aufweist oder in kleinen und sich oft ändernden Serien produziert wird [16,17]. Das Laserstrahl-Mikrobohren kommt als Fertigungstechnik immer dann zum Einsatz, wenn Geometrien erzeugt und Werkstoffe bearbeitet werden, die sich konventionellen Verfahren entziehen. Gegenüber den konventionellen Verfahren ist es durch die hohe Geschwindigkeit, die realisierbaren Bohrungsgeometrien, die Positionier- und Wiederholgenauigkeit sowie durch das gute Kosten/Leistungsverhältnis gekennzeichnet [18-21]. Das Laserstrahl-Mikrostrukturieren zeichnet sich insbesondere durch die Verfahrensflexibilität, die Vielzahl der bearbeitbaren Materialien sowie die hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit durch die Verwendung von schnellen Strahlführungs- und -formungskomponenten (wie z. B. Scansysteme) aus [22-24].

In den konventionellen Anwendungsbereichen spielt die räumliche Lasermikrobearbeitung bisher eher eine untergeordnete Rolle. Die Gründe hierfür liegen in der für den Bearbeitungsprozeß notwendigen komplexen Anlagentechnik, den hohen Investitionskosten und nicht zuletzt an den fehlenden Möglichkeiten zur Anlagenprogrammierstellung. Allerdings hat die 3D-Lasermikrobearbeitung, vor allem durch die Einführung neuer Produkttechnologien, wesentlich an Bedeutung gewonnen. Hier stehen insbesondere die

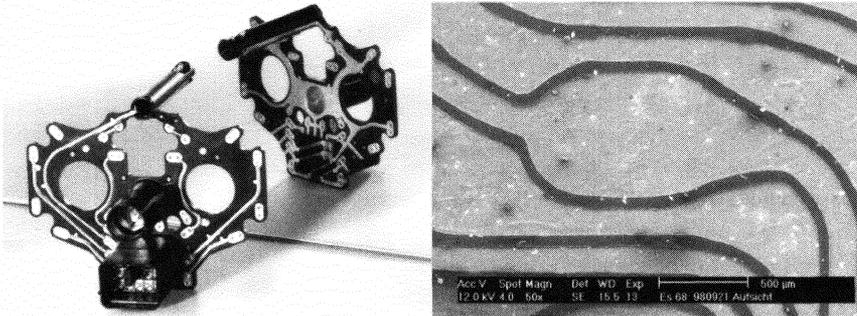


Bild 2: Beispiel für einen räumlichen Schaltungsträger und laserstrahlstrukturierte Leiterbahnstrukturen [25]

Produkte der Mikrosystemtechnik und Mechatronik im Vordergrund, bei deren Herstellung höchste Anforderungen gestellt werden (Bild 2, links).

Obwohl in den letzten Jahren eine große Anzahl von Produktideen und -konzepten in diesen Bereichen entwickelt worden sind, entstanden bisher nur in wenigen Fällen vermarktungsreife Produkte. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, daß geeignete Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) fehlen, die die heterogenen Funktionseinheiten und Teilkomponenten zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammenfassen und zur Integration der Komponenten auf engstem Raum benötigt werden. Beispielsweise können konventionelle Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren aufgrund der hohen dreidimensionalen Komplexität dieser Bauteile nicht eingesetzt werden und es sind neue Bearbeitungsverfahren erforderlich, die mit den derzeit geltenden Beschränkungen umgehen können, die insbesondere die Zugänglichkeit der Werkstückoberfläche betreffen.

Hier besteht für die 3D-Lasermikrobearbeitung die Aufgabe, das räumliche Schaltungsbild auf den Bauteilen herzustellen, indem die Leiterbahnen auf den dreidimensionalen, spritzgegossenen Schaltungsträgern (3-D MID) strukturiert werden. Die Herstellung von räumlichen Leiterbahnen durch Laserstrahl direktstrukturierung zeichnet sich vorrangig durch wenige Verfahrensschritte, kurze Durchlaufzeiten, hohe Präzision, Serientauglichkeit und der Möglichkeit aus, absolute Feinstleitertechnik zu realisieren (Bild 2, rechts). Aufgrund der flexiblen Herstellungsweise sind darüber hinaus auch schnelle Layoutänderungen möglich.

2.2 Laseranlagen für die räumliche Mikrobearbeitung

Grundsätzlich lassen sich alle Laseranlagen für die räumliche Bearbeitung in drei Hauptkomponenten untergliedern, die in unterschiedlichen Anlagen ähnliche Funktionen erfüllen. Dies sind die Laserstrahlquelle zur Strahlerzeugung, Komponenten für die Laserstrahlführung und -formung sowie die Anlagenkinematik. Nach EN ISO 11145 [26], vormals DIN 18730, unterscheidet man die aufeinander aufbauenden Kombinationen der Hauptkomponenten nach unterschiedlichen Integrationsstufen. So bildet die Laserstrahlquelle in Kombination mit der Laserstrahlführung und -formung die Laseranordnung. Die Laseranordnung bildet wiederum in Verbindung mit der Anlagenkinematik die Laseranlage. Die Anlage wird durch periphere Komponenten, Steuerung, Sensorik sowie Zusatz- und Hilfseinrichtungen ergänzt.

An eine Laseranlage für die räumliche Mikrobearbeitung werden hinsichtlich Bearbeitungsflexibilität, -geschwindigkeit und -genauigkeit besonders hohe Anforderungen gestellt. Der Anspruch auf eine große Flexibilität ergibt sich primär durch die kompakten, miniaturisierten Werkstücke, die sich durch ihre geringen Ausmaße, ihre räumliche Komplexität sowie durch Bearbeitungskonturen auf kleinstem Raum mit engen Krümmungsradien auszeichnen. Noch höhere Anforderungen an die Flexibilität werden gestellt, wenn ein möglichst breites Werkstückspektrum bearbeitbar sein soll. Dies gilt vor allem im Hinblick auf einen geplanten Einsatz der Anlage im Bereich der Prototypen- und Kleinserienfertigung, einem für den Laser konkurrenzlosen Anwendungsfeld. Aus diesen Gründen verfügen Laseranlagen für die 3D-Mikrobearbeitung häufig über mehrere Kinematiken, die zum einen eine hochflexible Bearbeitung ermöglichen, als auch eine leichte Anpassung an sich immer schneller ändernde Werkstückspektren und Rahmenbedingungen der Fertigungsprozesse erlauben.

Darüber hinaus finden sich im kinematischen Aufbau häufig Komponenten zur schnellen Laserstrahlführung und -formung wieder, die gegenüber den mechanischen Achsen eine weitaus höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit ermöglichen. Dies ist notwendig, um eine schnelle Bearbeitung des Werkstücks sicherzustellen und wirtschaftliche Prozeßgeschwindigkeiten zu erreichen. Alle genannten Anforderungen werden insgesamt dadurch verschärft, daß von der Anlagenkinematik auch bei komplizierten Konturen und hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten eine Bearbeitungsgenauigkeit im Mikrobereich einzuhalten ist.

2.2.1 Laserstrahlquellen

Im Gegensatz zur Makro-Lasermaterialbearbeitung, wo aufgrund ihrer hohen Ausgangsleistung fast ausschließlich CO₂- und Nd:YAG-Laser verwendet werden, sind im Bereich der Lasermikrobearbeitung neben Excimer- und Nd:YAG-Lasern auch weniger typische Laserstrahlquellen im Einsatz. So werden in bestimmten Anwendungsfällen etwa

Argon⁺- oder Helium-Laser eingesetzt, wenn ihre mediumspezifischen Eigenschaften einen besonderen Vorteil versprechen.

Excimer-Laser erzeugen in Abhängigkeit vom eingesetzten Gas (XeF, XeCl, KrF, ArF) kurzwellige UV-Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 193 und 351 nm. Sie werden vorrangig zum gezielten Materialabtragen im μm -Bereich, zur photochemischen Bearbeitung von Kunststoffen als auch zum Bohren kleinster Löcher verwendet. Da die unterschiedlichen Divergenzwinkel quer zur Ausbreitungsrichtung allerdings keine Fokussierung in einem Punkt zulassen, ist der Excimer-Laser für fokussierende Verfahren nicht ohne weiteres geeignet [22].

Als Festkörperlaser sind in der Mikrobearbeitung fast ausschließlich Nd:YAG-Laser im Einsatz. Typische Einsatzgebiete dieses Lasertyps sind das Feinschneiden, Fügen, Bohren, Markieren, der präzise Formabtrag sowie das laserstrahlunterstützte Ätzen. Trotz einer verhältnismäßig geringen mittleren Leistung erzeugt dieser Laser – in Verbindung mit einer sogenannten Güteschaltung (Q-switch) – Pulsleistungen im kW-Bereich bei gleichzeitig hohen Pulsenergien. Zur Erzeugung der für die Mikrobearbeitung vorteilhaften UV-Strahlung werden zunehmend frequenzkonvertierte Nd:YAG-Laser eingesetzt. Ein großer Vorteil dieser Laser ist die Möglichkeit zur guten Fokussierung des Laserstrahls. Dies gestattet eine äußerst präzise Bearbeitung in Größenordnungen, die bislang dem Excimer-Laser vorbehalten war [23].

2.2.2 Laserstrahlführung und -formung

Die Aufgabe der Strahlführung und -formung ist es, die von der Laserstrahlquelle emittierte Strahlung in ihrer Leistungsdichteverteilung und Strahlgeometrie der jeweiligen Bearbeitungsaufgabe anzupassen und zum Werkstück zu lenken. Zur Strahlführung werden je nach Leistung und Wellenlänge verschiedenartige reflektive Optiken oder Lichtleitfasern eingesetzt. Dem Strahlführungssystem folgt die Strahlformung, die die für den Bearbeitungsprozeß notwendige Strahlgeometrie erzeugt und den Laserstrahl auf das Werkstück fokussiert. Zur Strahlformung stehen neben Linsen zur Fokussierung auch Sonderoptiken zur Verfügung. Einige für die dreidimensionale Lasermikrobearbeitung wichtige Komponenten zur Strahlführung und -formung werden im folgenden näher erläutert:

F-Theta-Objektive

F-Theta-Objektive sind passive optische Elemente und dienen zur Fokussierung des Laserstrahls auf eine zweidimensionale Ebene, weswegen sie häufig im Zusammenhang mit Scansystemen verwendet werden. Sie bestehen aus einer Anordnung einer oder mehrerer Linsen, die in ihrer Abbildungseigenschaft der sogenannten F-Theta-Bedingung

$$SF = 2f\theta \quad (1)$$

genügen. Dabei verhält sich der Abstand des Fokus $SF/2$ vom Mittelpunkt der Bearbeitungsfläche proportional zur Brennweite f und zum Winkel θ des einfallenden Strahls (Bild 3). Mit dieser Eigenschaft liefern sie über die Projektionsfläche einen gleichmäßigen Fokusedurchmesser. Mit zunehmendem Abstand vom Mittelpunkt trifft der Laserstrahl

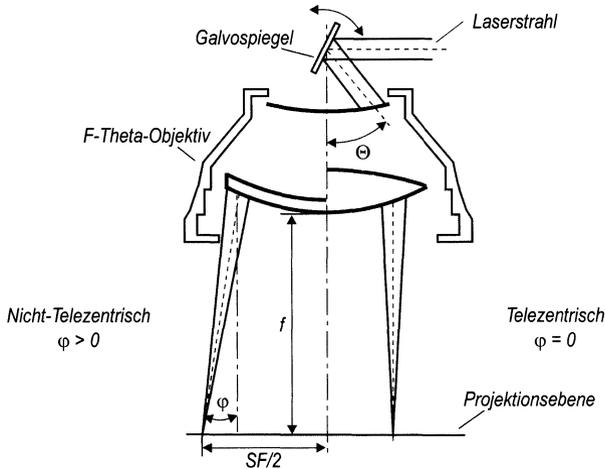


Bild 3: Aufbau und Strahlengang eines F-Theta-Objektivs in telezentrischer und nicht-telezentrischer Ausführung

allerdings nicht mehr senkrecht auf die Ebene, sondern unter einem zunehmenden Winkel $\varphi > 0$. Um diesen Fehler zu beheben, verwendet man spezielle, telezentrische Optiken, die einen senkrechten Strahleintritt $\varphi = 0$ über die gesamte Fläche sicherstellen, mit der Einschränkung, eine nicht mehr so große Bearbeitungsfläche abdecken zu können.

Lineartranslatoren

Alternativ zum F-Theta-Objektiv kann die Fokussierung des Laserstrahls auf eine Projektionsebene auch durch einen Lineartranslator erfolgen. Bei einem Lineartranslator handelt es sich um ein aktives Element, bestehend aus einem verfahrbaren Linsensystem, welches sich noch vor der Strahlablenkung durch die Galvospiegel im Strahlengang befindet. Der Lineartranslator ähnelt im Aufbau einem Teleskop, bei dem zur Planfeldkorrektur eine Fokussierlinse gegenüber einer festinstallierten Linse durch einen Galvo-Linearmotor schnell mechanisch nachgeführt wird. Die Bewegungsausführung kontrolliert ein Steuerungscomputer, der den Laserstrahl auf die Bearbeitungsfläche fokussiert. Aufgrund der zusätzlichen Bewegungsachse und der notwendigen Steuerung ist ein Lineartranslator im Aufbau komplexer als ein passives F-Theta-Objektiv.

Adaptive Optiken

Eine Adaptive Optik kann gleichsam wie ein Lineartranslator für die Fokussierung des Laserstrahls auf eine Projektionsebene genutzt werden, besitzt aber gegenüber einem Lineartranslator einen geringeren Laserfokushub. Adaptive Optiken bestehen im wesentlichen aus einem deformierbaren Spiegel, der sich innerhalb des Strahlengangs befindet und unterschiedlich stark mechanisch verformt werden kann, so daß die Lage des Fokus sowie der fokussierte Strahldurchmesser variiert werden können. Die mechanische Deformation des

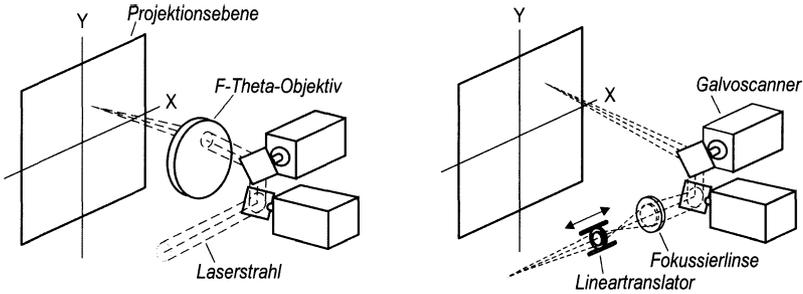


Bild 4: Scansysteme in der Pre-Objektiv- und Post-Objektiv-Anordnung [28]

Spiegels wird entweder durch hydraulischen Druck oder durch einen oder mehrere Piezoaktuatoren realisiert. Die kontrollierte Deformation des Spiegels zum Ebenenausgleich wird durch eine Steuerung vorgenommen [27].

Scansysteme (Galvoscaner)

Scansysteme dienen zur schnellen Ablenkung des Laserstrahls und können den Laserfokus mit hoher Geschwindigkeit auf einer Projektionsebene bewegen. Sie bestehen aus zwei, im Winkel von 90° zueinander angeordneten drehbaren Spiegeln, die jeweils durch einen Galvomotor bewegt werden. Für die Projektion des Laserfokus auf eine Ebene wird das Scansystem zusammen mit anderen Elementen zur Laserstrahlführung und -formung eingesetzt. Dabei unterscheidet man zwei Anordnungen [28]. Bei der Anordnung nach dem Pre-Objektiv-Prinzip wird eine Planfeldkorrektur durch ein F-Theta-Objektiv nach der Ablenkeinrichtung vorgenommen (Bild 4, links). Das Post-Objektiv-Scanprinzip verzichtet auf ein F-Tetha-Objektiv. Hier erfolgt die Fokussierung durch ein vor der Strahlablenkung angebrachtes dynamisches Fokussiersystem (Bild 4, rechts). Anstelle eines Lineartranslators kann auch eine Adaptive Optik zum Ebenenausgleich eingesetzt werden.

Eine Weiterentwicklung dieses Prinzips stellt das Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung dar, bei dem die Galvoscaner in Kombination mit einer F-Theta-Linse und einem dynamischen Fokussiermodul verwendet werden (Bild 5, links). Mit dem dynamischen Fokussiermodul wird die durch die F-Theta-Linse erzeugte Projektionsebene in Normalenrichtung verschoben, so daß ein Projektionsvolumen in Abhängigkeit vom möglichen Fokushub Δz aufgespannt wird. Die maximale Verschiebung der Projektionsebene hängt dabei von der Anordnung des dynamischen Fokussiermoduls und der Fokuslänge des Objektivs ab. Innerhalb dieses Projektionsvolumens, bei einem nicht-telezentrischen F-Theta-Objektiv etwa in Form eines Pyramidenstumpfs, ist es nun möglich, den Laserfokus mit hoher Geschwindigkeit in Form räumlich komplexer Konturen zu führen, ohne große Massen bewegen zu müssen, wie es bei der Handhabung des Werkstücks der Fall wäre (Bild 5, rechts). Hierbei wird die Position des Laserfokus während des Bearbeitungsvorgangs durch eine Steuerung dynamisch entlang der Bearbeitungskontur geführt.

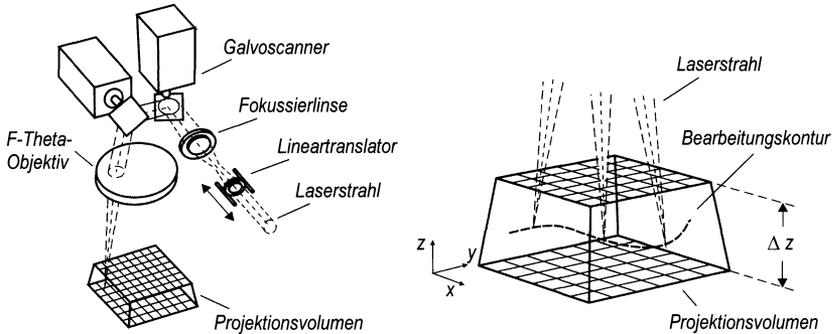


Bild 5: Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung

Mittlerweile stehen auch wassergekühlte Scanmodule für unterschiedliche Wellenlängen zur Verfügung, wie etwa das powerSCAN33-Modul der Fa. Scanlab, so daß die scannende Bearbeitung nicht nur auf Bearbeitungsverfahren mit einer geringen Laserleistung beschränkt ist, sondern auch bei hohen Laserleistungen eingesetzt werden kann. So erstrecken sich die Einsatzfelder von Scansystemen über alle Laserstrahlverfahren, wie Schneiden, Schweißen, Löten, Bohren und Strukturieren.

Neben dem Vorteil einer hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit zeichnen sich Scansysteme vor allem durch ihre Flexibilität aus. Mit ihnen sind frei programmierbare Fokusbewegungen erzeugbar, die nur durch die Fokussieroptik und das Ablenssystem begrenzt sind. Einschränkungen für den Einsatz von Scansystemen bestehen allerdings, wenn große Bearbeitungsräume benötigt werden oder Abschattungen auftreten, etwa zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück. Hier kann durch die Kombination mit einer Kinematik der Arbeitsbereich vergrößert und das Bearbeiten räumlicher Werkstücke ermöglicht werden, indem das Werkstück zur weiteren Bearbeitung jeweils neu positioniert wird.

2.2.3 Anlagenkinematiken

Die Aufgabe einer Anlagenkinematik ist es, eine Relativbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück auszuführen. Dabei sind je nach Fertigungsverfahren und Komplexität des Anwendungsfalls die Anforderungen an das Bewegungsvermögen der Anlagenkinematik unterschiedlich hoch. Prinzipiell sollte mit der zur Verfügung stehenden Anlagenkinematik ein möglichst breites Werkstückspektrum bearbeitbar sein. In jedem Fall sind für die Kinematik ausreichend viele Freiheitsgrade vorzusehen, um die vollständige Bearbeitung des Werkstücks sicherzustellen.

Anlagenkinematiken können nach ihren kinematischen Eigenschaften eingeteilt werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anzahl der Achsen, maximalen Achsgrenzen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie Genauigkeit und Steifigkeit. Dabei legen die Art und räumliche Anordnung sowie die geometrischen Abmessungen der steuerbaren Achsen den kinematischen Arbeitsbereich fest.

Schwierigkeiten beim Einsatz von Anlagenkinematiken treten auf, wenn aufgrund von Limitierungen der eingesetzten Kinematik diverse fertigungstechnische Aufgabenstellungen nicht oder nur unzureichend erfüllt werden. So ist die Bearbeitungsgeschwindigkeit durch die maximalen Geschwindigkeitswerte der einzelnen Achsen eingeschränkt. Insbesondere bei starken Bewegungsänderungen kann dies zu einer Reduzierung der programmierten Bahngeschwindigkeit führen. Das ist vor allem dann kritisch, wenn für die jeweilige Bearbeitungsaufgabe eine konstante Bearbeitungsgeschwindigkeit einzuhalten ist. Problemstellungen dieser Art lassen sich effizient durch den Einsatz von redundanten oder multiplen Kinematiken lösen:

- *Redundante Kinematiken* entstehen durch die Integration zusätzlicher, redundanter Achsen in eine nicht-redundante Kinematik [29]. Die hierdurch erzielten Vorteile bestehen nicht nur aus einem größeren Arbeitsraum, sondern auch aus einem gesteigerten Bewegungsvermögen. Darüber hinaus ermöglichen die redundanten Achsen Bewegungsfreiräume, die gezielt genutzt werden können, um eine Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit zu erreichen. So können nun neben Fertigungsaufgaben, bei denen etwa aufgrund von unvermeidbaren Kollisionen der Zugang des Lasers zum Bearbeitungsort nicht mehr möglich wäre, auch Aufgaben durchgeführt werden, die das Bewegungsvermögen bestimmter Anlagenachsen in kinematischer oder dynamischer Hinsicht bisher überschritten hätten. Mit der Integration von redundanten Achsen ist somit auch ein größeres Spektrum an Bearbeitungsaufgaben realisierbar.
- Unter *multiplen Kinematiken*, auch kooperierende Kinematiken genannt, versteht man die Verteilung von Freiheitsgraden auf unterschiedliche Kinematiken [30,31]. Im Gegensatz zu einer Einzelkinematik wird durch die Aufteilung der Freiheitsgrade die Komplexität reduziert und für bestimmte fertigungstechnische Problemstellungen eine weitaus leistungsfähigere Gesamtkinematik erzeugt. Ein weiterer Vorteil beim Einsatz von multiplen Kinematiken kann durch eine klar definierte Zuordnung des

aufgabenspezifischen Bewegungsverhaltens erreicht werden, indem etwa eine Kinematik das Werkstück in aufgabenspezifisch definierten Vorzugslagen hält, während eine andere Kinematik die Bearbeitung vornimmt.

Grundsätzlich gilt, daß mit steigender Anzahl der Achsen die Leistungsfähigkeit überproportional wächst. Je mehr Freiheitsgrade der Kinematik zur Verfügung stehen, desto mehr Bewegungsmöglichkeiten besitzt sie. So läßt sich durch den Einsatz redundanter oder multipler Kinematiken sowohl die Realisierbarkeit als auch die Effizienz der Ausführung steigern. Das wesentliche Problem besteht allerdings darin, die vorhandenen Leistungspotentiale unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu nutzen, denn mit zunehmender Komplexität der Gesamtkinematik und damit der Leistungsfähigkeit wird es gleichzeitig schwieriger, sie effizient einzusetzen.

2.2.4 Anlagensteuerungen

Anlagensteuerungen dienen zur Umsetzung von programmtechnischen Anweisungen in entsprechende Bewegungen der Anlagenkinematik und der Erfüllung zugehöriger Funktionen. Hierzu übernehmen sie die Aufgabe der Bedienerkommunikation, der Befehlsinterpretation, der Bahnsteuerung sowie der Koordinatentransformation. Die programmtechnischen Anweisungen werden von der Steuerung satzweise interpretiert, in Bewegungs- und Schaltfunktionen umgesetzt und deren Ausführung überwacht. Je nach Funktion wird entweder die Kinematik bewegt oder werden periphere Komponenten, wie etwa der Laser und Sensoren, angesteuert. Dabei bestehen bei den Steuerungen unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich des Speicherbedarfs, der Rechenkapazität und der Rechengenauigkeit [32-34].

Steuerungen für Scansysteme haben die hauptsächliche Aufgabe, die Bewegung des Laserfokus als Drehung der Spiegel zu koordinieren und eine konstante Fokussiergeschwindigkeit sicherzustellen. Bei Einsatz von Scansystemen mit dynamischen Fokussierelementen müssen die Galvoscanner zusätzlich zusammen mit dem Lineartranslator oder der Adaptiven Optik angesteuert werden. Die Steuerung berechnet aus den Sollkoordinaten des Laserfokus in Echtzeit eine Folge von Mikrovektoren, indem eine Transformation des Galvodrehwinkels in eine Ortsinformation durchgeführt und so eine konstante Bahngeschwindigkeit des Fokus ermöglicht wird. Die optischen Verzerrungen werden unmittelbar vor der Ausgabe kompensiert, hierfür enthält die Steuerung Tabellen für die Korrektur der Verzeichnungen. Bei einem Scansystem mit einer 3D-Fokuslagensteuerung gestaltet sich die Korrektur der Verzeichnungen schwieriger, da die Feldverzerrung hier stärker ins Gewicht fallen [35].

Handhabungskinematiken sind zumeist mit NC- bzw. RC-Steuerungen ausgerüstet, die eine exakte Bahnsteuerung in unterschiedlichen Bewegungsarten ermöglichen. Der wesentliche Unterschied zwischen den Steuerungen findet sich in den Interpolationsmöglichkeiten bei der Bewegungsausführung, wobei hauptsächlich drei Interpolationsarten verwendet werden: die Punkt-zu-Punkt-Bewegung (PTP), die Linear- und die Zirkular-Interpolation. Seltener sind Steuerungen mit zusätzlicher Splineinterpolation

verfügbar [36,37]. Bei der PTP-Bewegung sind nur Ausgangs- und Zielpunkt einer Bewegung definiert. Die Bewegung kann von der Istposition zur Sollposition auf einer beliebigen Bahn im Raum ausgeführt werden. Bei der Linearinterpolation wird die Bewegung mit vorgeschriebener Orientierung sowie mit definierter Bahngeschwindigkeit und -beschleunigung auf der Verbindungsstrecke zwischen Ist- und Sollposition ausgeführt. Die Kreisinterpolation ist durch die Definition von drei Punkten im Arbeitsraum eindeutig festgelegt.

Bei der Steuerung einer redundanten und multiplen Kinematik ist es aus unterschiedlichen Gründen schwierig, die Bewegungssteuerung in einer einzelnen Steuerung zusammenzufassen. Die Gründe hierfür liegen im wesentlichen am hohen Berechnungsaufwand für die komplexen Lösungsverfahren, der aufwendigen Synchronisation zwischen den unterschiedlichen Kinematikkomponenten sowie den insgesamt entstehenden Mehrkosten des Steuerungssystems. Darüber hinaus ist es auch nicht erforderlich, redundante und multiple Kinematiken als solche auf Steuerungsebene zu behandeln, da sie sich als Kombination von nicht-redundanten Kinematiken mit üblichen Steuerungssystemen betreiben lassen.

2.2.5 Beispiele von Anlagensystemen für die 3D-Lasermikrobearbeitung

Im Gegensatz zu Lasieranlagen für die zweidimensionale Mikrobearbeitung, die prinzipiell nur zwei kinematische Achsen benötigen, hat man es bei Lasieranlagen für die 3D-Mikrobearbeitung mit komplexen kinematischen Strukturen zu tun. Dies ist darin begründet, daß für eine räumliche Bearbeitung sechs Freiheitsgrade notwendig sind und damit eine gleiche Anzahl nicht-redundanter kinematischer Achsen. Allerdings kann der Laserstrahl in der Regel als rotationssymmetrisch angenommen werden. Insofern ist die Strahlachse eine redundante Achse, so daß letztlich nur fünf redundanzfreie Achsen benötigt werden.

Prinzipiell kann eine einzelne Handhabungskinematik die für die räumliche Bearbeitung notwendige Relativbewegung zwischen Werkstück und Laser ausführen. Problematisch ist allerdings, daß sich so keine praxisrelevanten Bearbeitungsgeschwindigkeiten für die Mikrobearbeitung erreichen lassen. Dabei besteht generell die Möglichkeit, entweder das Werkstück unter dem Laser oder den Laser über dem Werkstück zu führen. Seltener werden in diesem Zusammenhang Handhabungskinetiken in Form von mehrachsigen Verfahrtschienen eingesetzt, da sie etwa gegenüber Robotern eine weniger flexible Handhabung erlauben. Der Vorteil beim Einsatz eines Roboters ist der erreichbare Bearbeitungsraum, so daß sich auch größere Werkstücke bearbeiten lassen.

Ein wesentlicher Unterschied im kinematischen Aufbau gegenüber Lasieranlagen für die 3D-Makrobearbeitung resultiert aus der Möglichkeit, im Bereich der Lasermikrobearbeitung Scansysteme zur schnellen Laserstrahlführung einzusetzen, da hierdurch eine erhebliche Verkürzung der Bearbeitungszeit erzielt wird. Denkbar wäre ein alleiniger Einsatz eines Scansystems mit 3D-Fokuslagensteuerung. Dies führt allerdings zu Problemen, wenn größere Werkstücke bearbeitet werden sollen oder die Bearbeitungsbereiche schwer zugänglich sind. Aus diesen Gründen besteht die Notwendigkeit, eine Relativbewegung zwischen dem

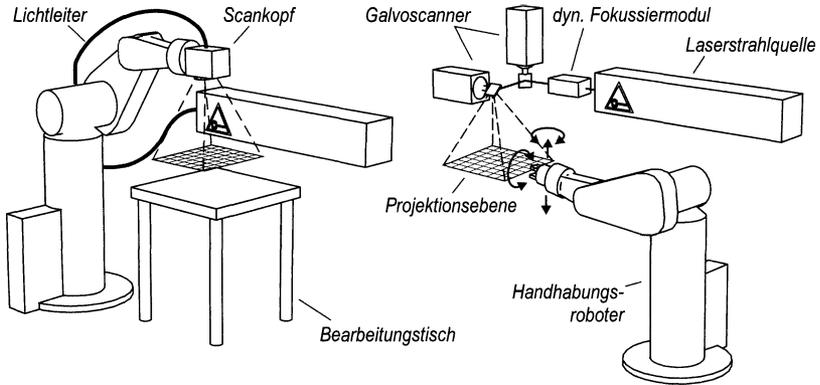


Bild 6: Mögliche Anlagenkonfigurationen, bestehend aus Laserstrahlquelle, Scansystem und Handhabungskinematik

Scansystem und dem Werkstück auszuführen. Hierbei kann entweder das Werkstück relativ zum Scansystem oder das Scansystem relativ zum Werkstück bewegt werden. Allerdings benötigt die Kinematik, welche die Relativbewegungen ausführt, eine hohe Positioniergenauigkeit, um den Genauigkeitsanforderungen im Mikrobereich gerecht zu werden.

Die Kombination aus Scansystem und Handhabungskinematik stellt ein für die 3D-Lasermikrobearbeitung universelles Anlagenkonzept dar, welches sich nicht nur für die verschiedenen Laserverfahren anwenden lässt, sondern aufgrund der Kombination aus schnellen „optischen“ Achsen zur Bearbeitung und einer Handhabungskinematik auch eine vollständige 3D-Bearbeitung mit einer Bearbeitungszeit ermöglicht, die auf die praxisrelevanten Bedürfnisse in der 3D-Bearbeitung hin optimiert ist. Als Handhabungskinematik kann hier entweder ein mehrachsiger Verfahrtsort oder ein Roboter eingesetzt werden. Dabei ist trotz der kinematischen Bauform von Robotern eine für die Mikrobearbeitung ausreichende Bearbeitungsgenauigkeit möglich [38].

Bei der Verwendung einer Handhabungskinematik in Kombination mit einem Scansystem können zwei Anlagenkonfigurationen unterschieden werden. Im ersten Fall wird der Scankopf durch die Handhabungskinematik über das Werkstück geführt (Bild 6, links). Dies ist durch die Entwicklung kompakter Scansysteme, die über Lichtleiter mit dem Laser verbunden sind, möglich geworden. Hierdurch entsteht eine hochredundante Kinematik mit einem sehr großen Bearbeitungsraum. Im zweiten Fall wird das Scansystem getrennt von der Handhabungskinematik eingesetzt. Mit der Trennung entstehen zwei kinematische Ketten – eine redundante multiple Kinematik. Eine Laseranlage, bestehend aus einem sechsachsigen Handhabungsroboter und einem Scansystem, wird in [38] und in [39] beschrieben. Diese Anlagenkonfigurationen besitzen für die räumliche Lasermikrobearbeitung damit drei redundante Freiheitsgrade.

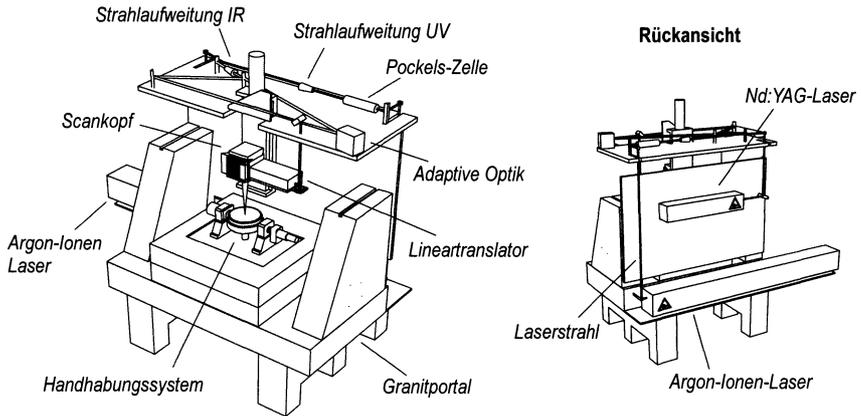


Bild 7: 8-Achs-Laseranlage in Portalbauweise mit Handhabungskinetik und Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung [40]

Höchst effizient wird in der räumlichen Lasermikrobearbeitung erst mit einem Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung gearbeitet. Allerdings besteht aufgrund der räumlichen Ausmaße und des erhöhten Gewichts dieser Scanköpfe als realisierbare Anlagenkonfiguration bisher nur die Möglichkeit, das Scansystem getrennt von der Handhabungskinetik einzusetzen. Für die Werkstückführung kann auch hier entweder ein mehrachsiger Verfahrtschisch oder ein Roboter eingesetzt werden. Eine in dieser Konfiguration realisierte Laseranlage ist in Bild 7 dargestellt [40]. Die Laseranlage verfügt über fünf mechanische und drei „optische“ Achsen und besitzt für die Lasermikrobearbeitung damit ebenfalls drei redundante Freiheitsgrade. Allerdings wird durch die zusätzliche „optische“ Achse eine günstigere Aufteilung der vorhandenen Achsredundanzen gegenüber den anderen Anlagenkonfigurationen erreicht: Da die Bearbeitung mit dem Scansystem nun in einem Projektionsvolumen erfolgen kann, sind weniger Handhabungsbewegungen zur Werkstückpositionierung notwendig, so daß die Ausführungseffizienz deutlich verbessert wird.

Die Anlage besteht aus einem Granitgestell in Portalbauweise, mit zwei auf der Rückwand übereinander angebrachten Laserstrahlquellen. Der aus der Laserstrahlquelle austretende Strahl wird parallel zur Rückwand nach oben über die Anlage gelenkt und in die auf dem Portalkopf befindlichen optischen Elemente geführt. Hier werden unterschiedliche Elemente, wie Pockels-Zelle oder Strahlaufweiter für unterschiedliche Wellenlängen durchlaufen, der Strahl anschließend vertikal in das dynamische Fokussiermodul gelenkt und schließlich durch das Scansystem auf das auf dem Handhabungssystem befindliche Werkstück fokussiert.

2.3 Programmierverfahren

Für die generelle Einteilung der Programmierverfahren in bestimmte Klassen sind aus der Literatur verschiedene Vorgehensweisen bekannt. Ein Ansatz stellt die Aufteilung der Programmierverfahren in Verfahrensgenerationen oder -stufen dar [41]. Einer der häufigsten Ansätze ist jedoch die Einteilung der Verfahren im Hinblick nach dem Ort der Programmerstellung, d.h. direkten und indirekten oder auch anlagennahen und anlagenfernen Verfahren [42]. Entsprechend werden die Programmierverfahren in zwei Klassen, in Verfahren zur prozeßnahen Programmierung (*online*), also direkt an der Anlage und in die Verfahren der prozeßfernen Programmierung (*offline*) eingeteilt. Im folgenden Überblick über die Programmierverfahren wird die Gliederung in Anlehnung an die bekanntere Online-/Offline-Einteilung vorgenommen.

2.3.1 Online-Programmierverfahren

Online-Programmierverfahren sind dadurch gekennzeichnet, daß die Programmierung an der Laseranlage erfolgt und sind im wesentlichen durch die Eingabe von Bewegungssequenzen oder Bewegungspositionen einer Bearbeitungsaufgabe charakterisiert. Innerhalb der Online-Programmierverfahren wird zwischen dem Programmieren an der Steuerung selbst, dem Play-back und dem Teach-in unterschieden. Beim Play-back-Verfahren wird in der Programmierphase die Kinematik oder ein kinematisches Ersatzmodell vom Bediener entlang den Bearbeitungskonturen geführt. Dabei zeichnet die Anlagensteuerung über die Winkelmeßsysteme der Antriebe kontinuierlich die aktuellen Achskoordinaten mit den Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten in einem definierten Zeit- oder Wegeraster auf. Die so aufgezeichneten Bewegungen können anschließend bei der Programmausführung wieder von der Anlage abgefahren werden.

Analog zum Play-back erfolgt beim Teach-in die Programmierung an der Lasersteuerung. Allerdings wird beim Teach-in generell nicht die gesamte Bewegung, sondern nur die Zielpunktinformation der Bewegung gespeichert, indem der Endeffektor der Laseranlage in die für den Bewegungsablauf notwendigen Bahnstützpunkte gefahren wird. Die zu jedem Zielpunkt zugehörige Bahnpunktinformation kann entweder als kartesischer Zielpunkt und -orientierung des Tool Center Points (TCP) oder als achsspezifische Stellung mit den zugehörigen Achskoordinaten zu einem Befehlssatz zusammengefaßt und in der Anlagensteuerung in das entstehende Programm eingefügt werden. Alle weiteren Programmdaten, wie Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorgaben sowie die Bewegungsart werden über die Tastatur entweder direkt an der Steuerung oder in einem Texteditor hinzugefügt. Die Eingabe von Technologie- und Sensordaten schließt die Programmerstellung ab.

Grundsätzlich können die Online-Programmierverfahren nur bei einfachen Werkstückgeometrien eingesetzt werden, da sie zahlreiche Nachteile mit sich bringen. So erfordert diese Art der Programmierung bei komplexen Werkstücken mit vielen

Bearbeitungskonturen einen hohen Aufwand und es entstehen in der Regel lange Anwenderprogramme. Die resultierenden Programme sind deshalb nur schwer zu überschauen, und der von Benutzer zu Benutzer unterschiedliche Programmierstil führt zu einer weiter sinkenden Übersichtlichkeit der erstellten Programme, so daß eine manuelle Programmänderung über einen Editor der Maschinensteuerung sich aus Gründen eines vertretbaren Arbeitsaufwandes nur sehr aufwendig durchführen läßt. Zudem ist bei dieser Vorgehensweise auch die Fehlerquote relativ hoch, und die Qualität des Anwenderprogramms hängt maßgeblich von der individuellen Qualifikation, dem Erfahrungspotential und der Motivation des Programmierers ab [43].

Der wesentliche Nachteil aller Online-Programmierverfahren liegt jedoch in der Nutzung der realen Laseranlage, die damit während des Programmiervorgangs einschließlich der Testzeit nicht für die Produktion zur Verfügung steht. Die wirtschaftliche Zielsetzung erfordert allerdings ein Programmierkonzept, das die Produktion minimal behindert, also größtenteils unabhängig vom Produktionsprozeß durchgeführt werden kann. Dies wird durch den Einsatz von Offline-Programmierverfahren erreicht. Für die räumliche Laserbearbeitung sind diese von großer Bedeutung, zum einen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, zum anderen, da hierdurch die Programmerstellung wesentlich vereinfacht wird [44].

2.3.2 Offline-Programmierverfahren

Aufgrund der genannten Nachteile der Online-Programmierverfahren wurden indirekte Programmiermethoden entwickelt, die eine teilweise oder vollständige Erstellung der Anwenderprogramme ohne die reale Laseranlage ermöglichen. So bezeichnet der Begriff Offline-Programmierung einen Vorgang, bei dem die Programmerstellung auf steuerungsunabhängigen Rechnern, getrennt von der Laseranlage, durchgeführt wird. Das Erstellen und Testen der Anwenderprogramme erfolgt in denen der Fertigung vorgelagerten Bereichen und ist somit Bestandteil der Fertigungsplanung. Durch das Entkoppeln des Programmiervorgangs vom eigentlichen Fertigungsprozeß steht die Laseranlage weiterhin zur Verfügung. Dies erlaubt aufgrund des parallelen Programmiervorgangs einen nahezu kontinuierlichen Betrieb der Anlage, so daß die Programmierzeit nicht in die Produktionszeit der Laseranlage fällt. Die Offline-Verfahren ermöglichen somit eine hauptzeitparallele Programmerzeugung.

Innerhalb der Offline-Programmierverfahren wird zwischen den textuellen und den graphisch-unterstützten Verfahren unterschieden [45,46]. Bei den textuellen Offline-Verfahren erstellt der Anwender die Programme ähnlich wie in einem Textverarbeitungssystem. Dieser Ansatz hat jedoch den Nachteil, daß vom Anwender die Kenntnis einer Steuerungs- oder höheren Programmiersprache gefordert wird. Darüber hinaus bieten diese Systeme gar keine oder nur eine geringe graphische Darstellung, was zusätzlich ein hohes räumliches Vorstellungsvermögen des Bedieners voraussetzt. Aus diesem Grund wird bei der textuellen Offline-Programmierung auch häufig hybrid programmiert, d.h. im Anschluß an die Offline-Programmerstellung werden die Bewegungen an der Laseranlage manuell „geteacht“.

Um die Wirtschaftlichkeit des Lasereinsatzes weiter zu steigern, wurden graphisch-unterstützte Werkzeuge zur Planung und Simulation entwickelt. Je nach Komplexität der graphischen Bedienerunterstützung unterscheidet man zwischen Programmiersystemen mit einfachen Benutzerdialogen zur Programmerstellung bis hin zu graphisch-interaktiven Programmiersystemen. Bei letzteren erfolgt die Formulierung der Bearbeitungsaufgabe nicht mehr durch die direkte Eingabe der Programmtexte, sondern dialoggeführt, ergänzt um ein graphisches Abbild der Laseranlage. Der eigentliche Programmiervorgang findet in Form eines graphischen Teach-in statt, bei dem die simulierte Laseranlage durch auf dem Bildschirm befindliche Funktionseinheiten verfahren werden kann [47]. Ist in dem Programmiersystem auch ein Simulationsmodul enthalten, so kann ein dynamischer Simulationsablauf des Anwenderprogramms durchgeführt werden. Dies ist insbesondere für umfangreichere Bearbeitungsaufgaben hilfreich, da durch die graphische Darstellung von Prozeßabläufen die erstellten Anwenderprogramme vorab getestet und optimiert werden können, bevor sie an der realen Laseranlage ausgeführt werden [48].

Eine weitere wichtige Aufgabe bei der Anlagenprogrammierung ist die Vermeidung von Kollisionen [49-51]. Bei einer reinen visuellen Kontrolle der Bewegungen auf dem Bildschirm – ohne Systemunterstützung – hängt die Qualität der Kollisionsprüfung stark von der Aufmerksamkeit des Systembedieners ab. Dies stellt insbesondere bei der Simulation komplexer Programme mit langen Maschinenlaufzeiten ein Problem dar. Wird die Kollisionskontrolle innerhalb des Programmiersystems durchgeführt, ist allerdings ein hoher Rechenaufwand notwendig, da erst die 3D-Simulation eine genaue geometrische Kollisionsprüfung ermöglicht [52].

Eine weitere Unterstützung wird erreicht, wenn mit dem Programmiersystem auch eine Bahnplanung durchgeführt werden kann. Ein im Programmiersystem enthaltenes Bahnplanungsmodul übernimmt dabei die Aufgabe, den Bewegungsverlauf der Anlagenkinematik für einzelne Bearbeitungskonturen zu planen. Hierfür werden zunächst die Laserbahnen berechnet und anschließend eine im Hinblick auf das Bewegungsverhalten der Führungsmaschine optimierte Bewegung der Anlagenkinematik bestimmt. Dies wird erreicht, indem die Bewegungsabläufe an die Konturgeometrie angepaßt und Bearbeitungsstrategien unter Berücksichtigung von anlagen- und technologischen Randbedingungen angewandt werden. Die Überprüfung des erstellten Bearbeitungsprogramms erfolgt anschließend im Simulationssystem.

2.4 Anlagenprogrammierung für die 3D-Mikrobearbeitung

Die Hauptaufgabe der Programmierung von Laseranlagen für die 3D-Mikrobearbeitung ist die Erstellung von Anwenderprogrammen zur Erfüllung gegebener Bearbeitungsaufgaben. Ein Anwenderprogramm ist nach VDI 2863 [53] eine Sequenz von programmtechnischen Anweisungen, die eine vorgegebene Fertigungsaufgabe erfüllen. Grundlage für die Erstellung der Anwenderprogramme ist die Beschreibung der Werkstückgeometrie. Diese Beschreibung wird meist in Form von Daten bereitgestellt, die im Bereich der Konstruktion erstellt wurden oder direkt aus dem vorhandenen Werkstück abgeleitet werden.

Die Anforderungen, die im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung an die Programmierung gestellt werden, sind sehr hoch. Die Probleme, die im allgemeinen bei der räumlichen Bearbeitung auftreten, sind hier noch stärker ausgeprägt, wie im folgenden dargestellt wird. Dies resultiert aus der Tatsache, daß die Anlagenprogrammierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung die Anforderungen und Problematiken der 2D-Lasermikro- und der 3D-Lasermakrobearbeitung miteinander vereint.

2.4.1 Probleme und Randbedingungen

Die hohen Anforderungen an die Erstellung von Anwenderprogrammen im Bereich der räumlichen Lasermikrobearbeitung resultieren vor allem aus den charakteristischen Eigenschaften der Werkstücke, der damit verbundenen Komplexität der Fertigungseinrichtungen sowie aufgaben- und technologiebedingten Randbedingungen und wirtschaftlichen Zwängen. In Bild 8 sind die wichtigsten Randbedingungen zusammengefaßt.

Wie die 2D-Lasermikrobearbeitung ist die 3D-Lasermikrobearbeitung durch die gleiche Bearbeitungsqualität und, aufgrund der Werkstückdimension, durch eine geringe Prozeßeinsicht des Bedieners sowie hohe Genauigkeitsanforderungen geprägt. Allerdings zeichnet sich die 3D-Lasermikrobearbeitung durch die räumliche Bearbeitungsmöglichkeit und damit einem wesentlich breiteren Werkstückspektrum aus. Werkstücke mit komplexen Freiformflächen erschweren die Anlagenprogrammierung erheblich, so daß die Programmerstellung generell mit einem hohen Aufwand verbunden ist. Insbesondere die Programmierung von Bearbeitungskonturen mit starken Konturkrümmungen auf kleinstem Raum gestaltet sich als aufwendig und schwierig, da aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen im Bereich starker Konturkrümmungen eine hohe Bahnstützpunktdichte erforderlich ist und der Laserstrahl unter einer ausreichend senkrechten Ausrichtung zur Bearbeitungsoberfläche einwirken muß. Dabei kann es aufgrund von Kollisionen oder Erreichbarkeitsproblemen der Anlagenkinematik zusätzlich notwendig sein, ständig wechselnde Eingriffsverhältnisse programmieren zu müssen. Vielfach muß daher das Werkstück während der Bearbeitung neu positioniert werden, auch um alle Bearbeitungsflächen erreichen zu können.

Mit der 3D-Makrobearbeitung teilt sich die 3D-Mikrobearbeitung die Notwendigkeit zur räumlichen Führung des Laserstrahls. Eine Voraussetzung für beide Verfahren besteht

Werkstück	Lasieranlage	Technologie/Prozeß	Wirtschaftlichkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Freiformflächenbearbeitung • starke Konturkrümmungen • Einfallswinkel zwischen Laserstrahl und Werkstückoberfläche • Kollisionen • Erreichbarkeit • Abmessungen 	<ul style="list-style-type: none"> • redundante und multiple Anlagenkinematik • Genauigkeit der Bearbeitung • maximale Verfahrensbereiche • Werkstückpositionierung • Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozeßfenster • keine Benutzertransparenz • ausreichende Bearbeitungsqualität • Einhalten von günstigen Vorzugslagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Anlagenprogramme: <ul style="list-style-type: none"> - minimale Bearbeitungszeit - minimale Verfahrenwege - mechanische Beanspruchung • Programmieraufwand

Bild 8: Randbedingungen bei der Anlagenprogrammierung für die räumliche Lasermikrobearbeitung

insofern darin, komplexe Kinematiken einsetzen zu müssen, die eine derartige Flexibilität erlauben. Allerdings unterscheidet sich die 3D-Lasermikrobearbeitung von der 3D-Lasermakrobearbeitung hinsichtlich des Werkstückspektrums, den Anforderungen an die Bearbeitungsgenauigkeit sowie durch die Elemente zur Laserstrahlführung und -formung. So besitzt die 3D-Lasermikrobearbeitung durch den Einsatz von redundanten und multiplen Kinematiken generell eine höhere Anlagenkomplexität. Zudem kann bei der Verwendung eines Scansystems die Bestimmung der Lage des Eingriffspunktes nicht mit Hilfe des Laser selbst vorgenommen werden. Auf eine in diesem Zusammenhang häufig genutzte Möglichkeit, nämlich sichtbares Licht emittierende Helium-Neon-Laser zu verwenden, die koaxial in den Strahlengang des Bearbeitungslasers eingespiegelt werden, kann aufgrund der notwendigen Genauigkeiten nicht zurückgegriffen werden. Ein weiteres Problem tritt dadurch auf, daß eine visuelle Kollisionsüberprüfung zwischen Laserstrahl und Werkstück kaum möglich ist, da der Strahlverlauf nicht sichtbar ist.

Die 3D-Lasermikrobearbeitung wird durch verschiedene fertigungstechnische Parameter beeinflusst, die bei der Bearbeitung und damit auch bei der Anlagenprogrammierung entsprechend zu berücksichtigen sind und das Prozeßfenster für den jeweiligen Fertigungsprozeß festlegen. Sie resultieren aus den Prozeßeinstellparametern, den Werkstück- und Werkstoffparametern sowie den Anlagenparametern. Die Prozeßeinstellparameter bestimmen weitestgehend das Bearbeitungsergebnis und sind in gewissen Grenzen variierbar, so daß sich mit ihnen die Prozeßbedingungen festlegen lassen. Einzelne Prozeßparameter können hierbei auch während der Bearbeitung angepaßt werden. Wichtige Parameter sind unter anderem die Laserparameter, wie Pulsleistung, Pulsdauer und Pulsenergie. Die Werkstück- und Werkstoffparameter haben direkten Einfluß auf die Wahl der Prozeßeinstellparameter. Hier bestimmt hauptsächlich das Werkstückspektrum, genauer die Werkstückgeometrie und -dimension sowie das Werkstückmaterial, die erforderlichen Prozeßeinstellungen. Die Anlagenparameter sind durch den Typ und die Bauweise festgelegt und daher nicht veränderbar.

Neben den genannten prozeßbedingten Anforderungen und Randbedingungen müssen auch wirtschaftliche Anforderungen bei der Programmierung berücksichtigt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen ist man bestrebt, die Anwenderprogramme unter Berücksichtigung von aufgabenspezifisch relevanten Optimierungskriterien zu erstellen. Die Optimierungskriterien sind prinzipiell von der jeweiligen Fertigungsaufgabe abhängig, generell gelten Zeit- und Kostenminimierung. Dabei kommt bei Werkstücken, die in großen Stückzahlen hergestellt werden, der Optimierung der Anwenderprogramme eine besondere Bedeutung zu. Bei der Neu- oder Umprogrammierung spielt insbesondere das Verhältnis von Programmierzeit zu Ausführungszeit als Indikator für die Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle. Kennzeichnend für die räumliche Bearbeitung ist, daß der Aufwand für die Programmerstellung im Vergleich zur eigentlichen Ausführungszeit sehr hoch ist. So kann an stark konturierten Werkstücken das Verhältnis von Programmier- zur Bearbeitungszeit von 10:1 bis 1000:1 betragen [54]. Dies ist unmittelbar auf die genannten Anforderungen zurückzuführen, die sich bei der räumlichen Bearbeitung ergeben.

2.4.2 Aufgaben der Bearbeitungsplanung

Die Aufgabe der Bearbeitungsplanung für die 3D-Lasermikrobearbeitung ist es, eine Optimierung der Bearbeitung und eventuell sogar eine Verbesserung hinsichtlich der Bearbeitungsqualität zu erreichen, indem vorhandene Freiräume bei der Bearbeitung ausgenutzt und fertigungstechnische Probleme und Engpässe von vornherein erkannt und vermieden werden. Für die Laserbearbeitung typische Freiräume ergeben sich zum einen, indem die Orientierung des Laserstrahls relativ zur idealen senkrechten Ausrichtung in vom Prozeßfenster vorgegebenen Grenzen variieren werden kann. Zum anderen erhöht eine günstige Platzierung des Werkstücks relativ zur Anlage die Zugänglichkeit und beeinflusst deutlich den Bearbeitungsvorgang.

Bei der 3D-Lasermikrobearbeitung ergeben sich die wichtigsten Freiräume vor allem durch die kinematische Kombination von Scansystem und Handhabungskinetik. Die Bearbeitungsplanung hat daher gezielt die potentiellen Fähigkeiten der redundanten und multiplen Anlagenkinematik auszuschöpfen. Denn die Bearbeitungsvorteile gegenüber einer nicht-redundanten Einzelkinematik werden erst effektiv genutzt, wenn alle an der Ausführung beteiligten Kinematiken unter Optimalitätskriterien und technologiespezifischen Bedingungen zusammenwirken. Bei der Bearbeitung sind daher vor allem die Achsredundanzen auszunutzen, um eine technologisch- und aufgabenspezifisch optimierte sowie kollisionsfreie Bearbeitung zu erreichen.

Aufgrund der Synchronisationsproblematik der Steuerungen und dynamischen Überlagerungen bei der parallelen Bewegungsausführung von Scansystem und Handhabungskinetik wird die Bearbeitung des Werkstücks nach dem Master/Slave-Prinzip vorgenommen, bei der eine Kinematik (Slave) sich gegenüber einer anderen Kinematik (Master), die etwa das Werkstück trägt, bewegt [55,56]. Die Master-Kinetik befindet sich dabei in einer aufgabenspezifisch definierten Vorzugslage. Die räumliche Bearbeitung erfolgt

insofern durch das Verschieben des Bearbeitungsbereichs des Scansystems über die Oberfläche des Werkstücks mit der daran anschließenden Bearbeitung.

Generell führt das Bearbeiten in Vorzugslagen zu einer höheren Ausführungseffizienz und Qualitätssteigerung. Zum einen verbessert sich durch eine geeignete Werkstückorientierung die Zugänglichkeit zum Werkstück, so daß ein häufiges Umorientieren aufgrund von Kollisionsproblemen bereits im Vorfeld vermieden werden kann. Zum anderen wird bei der Bearbeitung eine insgesamt bessere Orientierung des Laserstrahls zum Werkstück erreicht.

Bei der Bearbeitung hat das Scansystem die Aufgabe, den eigentlichen Bearbeitungsvorgang durchzuführen. Mögliche Bearbeitungsstrategien bei einem Scansystem sind die zeilenweise Bearbeitung (*line scanning*) mit konstanter Ablenkungsgeschwindigkeit und Intensitätsmodulation des Lasers oder das Abfahren von Konturen (*vector scanning*). Die zeilenweise Bearbeitung ist jedoch ein langsames Verfahren, da die gesamte, möglichst ebene Bearbeitungsfläche abgefahren werden muß, und auch nur für Bearbeitungsverfahren möglich, die ohne eine hohe Energieeinbringung in das Werkstück auskommen. Bei der Konturbearbeitung mit dem Scansystem sind prinzipiell keine Bearbeitungsstrategien zu berücksichtigen, da die Galvomotoren der Scansysteme extrem schnell beschleunigen und hierdurch in der Regel keine Beeinträchtigung des fertigen Werkstücks entsteht.

Werden die Bearbeitungsgrenzen des Scansystems erreicht, so haben Handhabungssysteme die Aufgabe diese zu kompensieren, indem sie die Relativbewegungen bzw. die Zustellfunktion zwischen Scansystem und Werkstück ausführen und damit die vollständige Bearbeitung des Werkstücks ermöglichen. Im Sinne einer technologisch- und aufgabenorientierten Bearbeitungsoptimierung sind somit von der Handhabungskinematik jeweils diejenigen Vorzugslagen einzunehmen, die eine optimale Bearbeitung des Werkstücks durch das Scansystem ermöglichen.

Nach diesem Konzept wird die Handhabungskinematik als Mastersystem definiert, während dem Scansystem Slave-Verhalten zugeordnet wird. Dabei wird auf Basis der Bearbeitungsplanung und unter Erfüllung der aufgabenspezifischen Anforderungen der Master von Vorzugslage zu Vorzugslage bewegt. Im Vergleich zum Scansystem ohne 3D-Fokuslagensteuerung sind bei der Bearbeitung aber deutlich weniger Vorzugslagen notwendig, da nunmehr erst mit der Handhabungskinematik verfahren werden muß, wenn sich die Bearbeitungskonturen außerhalb des Bearbeitungsvolumens und nicht mehr außerhalb der Projektionsebene des Scansystems befinden.

2.4.3 Derzeitige Methoden

Eines der vorrangigen Einsatzgebiete von Laseranlagen für die 3D-Mikrobearbeitung ist die Kleinserien- und Prototypenherstellung, bei der in der Regel kleine Losgrößen bei einem stark wechselnden Werkstückspektrum gefertigt werden. Dies hat zur Folge, daß häufig neue Anlagenprogramme erstellt werden müssen. Die negativen Folgen sind geringe Hauptnutzungszeiten und eine Einschränkung der Flexibilität, die der Laser als Werkzeug bietet. Vor diesem Hintergrund ist die schnelle und flexible Erstellung der Anwenderprogramme eine unmittelbare Voraussetzung.

Die vorgestellten Programmierverfahren sind prinzipiell unabhängig von ihrem Einsatzgebiet sowie den verwendeten Laseranlagen. Allerdings haben im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung neben rein prozeßtechnischen und wirtschaftlichen Erwägungen und der Komplexität der Bearbeitungsaufgabe auch noch andere wichtige Faktoren einen Einfluß auf die grundsätzliche Wahl für ein geeignetes Programmierverfahren. So sind die geringe Prozeßeinsicht sowie die Genauigkeitsanforderungen mit die wesentlichen Entscheidungskriterien für das Programmierverfahren. Nur die rechnergestützte Programmierung kann sinnvoll für die Erstellung von Anwenderprogrammen eingesetzt werden.

Die rein textuelle Offline-Programmierung ist bestenfalls für die Erzeugung eines Programmgerüsts einsetzbar, denn der Anteil der fehlerhaften Programme und der notwendige Aufwand für Fehlererfassung und -korrektur nimmt mit dem Komplexitätsgrad der Programmierung bzw. der Anzahl gesteuerter Maschinenachsen zu. Zum einen bereitet die numerische Spezifizierung von Positions- und Bewegungsangaben für Scansystem und Handhabungskinematik Schwierigkeiten und stellt erhebliche Anforderungen an das räumliche Vorstellungsvermögen des Bedieners. Zum anderen ist die Programmierung des Scansystems, d.h. die Ermittlung der Endeffektorposition (TCP) in Abhängigkeit von der aktuellen Orientierung der Handhabungskinematik, für die räumliche Bearbeitung praktisch nicht durchführbar. Des weiteren läßt die textuelle Programmierung auch keine effiziente Nutzung des real vorhandenen Bewegungsvermögens der eingesetzten Anlagenkinematik zu.

Eine textuelle Erstellung der Anwenderprogramme ist insofern umständlich und bei der räumlichen Freiformflächenbearbeitung im Mikrobereich daher ausschließlich rechnerbasierten Programmiersystemen vorbehalten. Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz eines Programmiersystems für die 3D-Lasermikrobearbeitung ist aber, daß zum einen eine Simulation der Bearbeitung für den Bediener durchgeführt werden kann, um die resultierenden Achsbewegungen nachvollziehen zu können. Zum anderen ist die Kollisionskontrolle rechnergestützt durchzuführen, da eine visuelle Kollisionskontrolle nicht möglich ist. Als Konsequenz ergibt sich, daß eine Anwenderprogrammerstellung für die 3D-Lasermikrobearbeitung nur durch ein graphisches-interaktives Programmiersystem mit Bearbeitungsplanung, -simulation und rechnergestützter Kollisionskontrolle durchgeführt werden kann. Während dieser Problematik bereits seit Jahren im Bereich der Blechteilefertigung im Automobilbau – durch die Verwendung von de-facto-standardisierten

Anlagenkinematiken, wie Sechs-Achsen-Knickarmroboter und Portalanlagen und von informationstechnischer Seite durch Offline-Programmiersystemen – begegnet wird, fehlen diese erforderlichen fertigungstechnischen Voraussetzungen im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung.

Verfügbare Programmiersysteme basieren aufgrund der Marktsituation daher generell auf Robotersimulationen mit sechs kinematischen Achsen oder Portalanlagen mit fünf Anlagenachsen [42,57-59]. Zu den in Deutschland bekanntesten und leistungsfähigsten Systemen zählen beispielsweise CATIA-Robotics [60], ROBCAD [61] und TOPLAS3D (Bild 9) [62]. Während CATIA-Robotics als Zusatzmodul für das CAD/CAM/CAE-System CATIA erhältlich ist, wurden die anderen Systeme als dedizierte Programmier- und Simulationssysteme entwickelt.

Im Hinblick auf einen geplanten Einsatz dieser Systeme für die 3D-Lasermikrobearbeitung weisen die bestehenden Systeme jedoch eine Reihe von Defiziten auf. Während bei der Lasermikrobearbeitung Vorzugslagen berechnet werden und damit die Bearbeitungsplanung des gesamten Werkstücks im Vordergrund steht, steht bei der Lasermakrobearbeitung die Bahnplanung, d.h. das Bearbeitungsverhalten der Anlagenkinematik bei einer einzelnen Kontur im Mittelpunkt. Bei der Bahnplanung wird unabhängig von den übrigen Bearbeitungskonturen die Bearbeitung festgelegt und der jeweils geeignetste Bewegungsablauf der Kinematik für eine Bearbeitungskontur bestimmt. Hierbei ist es wichtig, den Bearbeitungskopf während der Bearbeitung so zu führen, daß eine möglichst gleichbleibende Bearbeitungsgeschwindigkeit erreicht wird und Kollisionen mit dem Werkstück vermieden werden [42,63].

Im Gegensatz hierzu wird bei der 3D-Lasermikrobearbeitung die Bearbeitung durch ein Scansystem vorgenommen. Insofern muß bei der Bearbeitungsplanung die Strahlführung und -formung explizit berücksichtigt werden, da die Kollisionsbetrachtungen nicht nur auf die Anlagenkomponenten, sondern auf den aus dem Scankopf austretenden Laserstrahl ausgedehnt werden müssen. Dies ist notwendig, da die Kollisionen nicht zwischen Anlagenkomponenten und Werkstück, sondern aufgrund des Abstands zwischen Scansystem und Werkstück primär zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück erfolgen. Dies erfordert die Modellierung des Laserstrahlverlaufs zwischen Scankopf und Werkstückoberfläche. Ein weiteres Defizit besteht darin, daß in den verfügbaren Programmiersystemen nur schlecht eine Ablage von spezifischen mikrotechnologischen Informationen erfolgen kann, die dann auch noch in der Planungsphase berücksichtigt werden. Wichtig für eine effiziente, rechnergestützte Programmierung ist es aber, daß die Programmierung nicht nur anlagen-, sondern vor allem auch technologieorientiert durchgeführt wird.

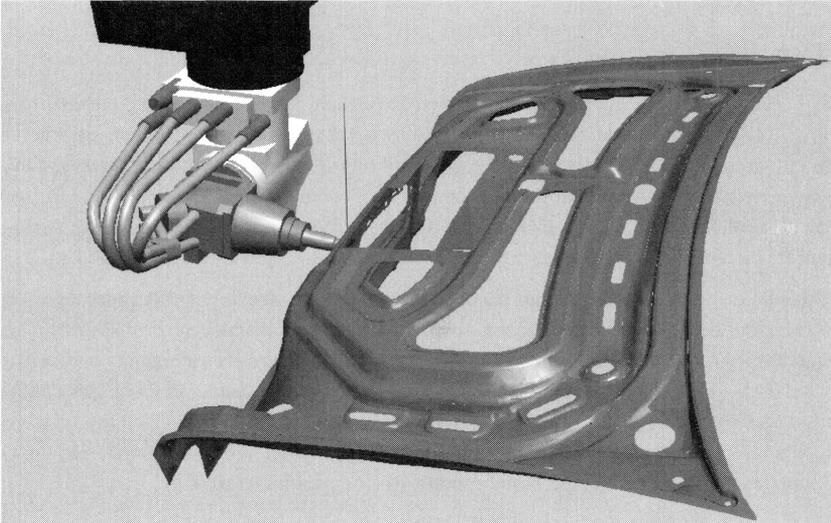


Bild 9: Darstellung der Anlagenprogrammierung im Programmiersystem TopLas3D [62]

Die Planung von Bearbeitungsvorgängen stellt bei der dreidimensionalen Lasermikroprogrammierung einen Problembereich dar, der zur Zeit noch keine ausreichende Beachtung findet, da auch in Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten noch keine applikationsspezifischen Programmiersysteme erarbeitet worden sind. Bisherige Ansätze sind nur als Postprozessoren für 3D-Laseranlagen entwickelt und umgesetzt worden. So wird in [38] ein in ein bestehendes CAD-System integrierter Postprozessor für die 3D-Lasermikrobearbeitung beschrieben, der aus den Bearbeitungskonturen des Werkstücks ein Anwenderprogramm für eine Kinematikkombination aus Handhabungsroboter und Scansystem erstellt. Die Programmgenerierung erfolgt bei diesem System ohne Berücksichtigung des Bewegungsverhaltens der Anlage. Auch Algorithmen zur Bearbeitungsplanung werden nicht vorgestellt, so daß auch keine Berechnung optimaler Vorzugslagen stattfindet. Zudem ist eine Eigenanpassung des Programms, d.h. ein Eingriff des Benutzers, nicht möglich, so daß nachträglich eine Korrektur des generierten Bewegungspfades nicht vorgenommen und prozeßtechnisches Wissen in Form von Technologieparametern nicht hinzugefügt werden kann. Zudem erfolgt auch keine Simulation des Bearbeitungsergebnisses, so daß der Programmablauf bis zum Zeitpunkt der Bearbeitung dem Benutzer nicht transparent ist. Der Grund hierfür liegt nicht zuletzt darin, daß keine umfassende rechnerinterne Abbildung der Anlage erfolgt und damit vom System auch keine Kollisionserkennung oder -vermeidung vorgenommen werden kann.

2.5 Zusammenfassung

Der Laser konnte sich bisher in nahezu allen Bereichen der Mikrofertigung etablieren. Zu seinen Anwendungsfeldern zählen das Mikroschweißen und -schneiden, -löten, -bohren und -strukturieren. Obwohl für die räumliche Lasermikrobearbeitung mittlerweile leistungsfähige Anlagensysteme zur Verfügung stehen, konnten die Potentiale dieser Technologie noch nicht genutzt werden. Der wesentliche Grund hierfür ist, daß die Programmierung dieser Anlagen einen Problembereich darstellt, der zur Zeit noch keine ausreichende Beachtung findet.

Manuelle Programmierverfahren scheiden aufgrund der Genauigkeitsanforderungen, der Komplexität der Bearbeitungsaufgabe sowie der kaum vorhandenen Prozeßeinsicht des Programmierers aus. Auch lassen die in der 3D-Lasermikrobearbeitung eingesetzten redundanten und multiplen Kinematiken kein aufgaben- und kinematikspezifisches optimiertes Bewegungsverhalten auf der Basis intuitiver Entscheidungen des Programmierers zu. Allein rechnerbasierte Verfahren bringen die erforderlichen Voraussetzungen mit, um das im Rahmen der Programmierung bestehende Bearbeitungsproblem zu lösen.

Neben der Realisierung einer geschlossenen Verfahrenskette bei der Programmierung eröffnen sie die Möglichkeit zur Integration von intelligenten Verfahren zur Bearbeitungsplanung für die 3D-Lasermikrobearbeitung. Durch die Bearbeitungsplanung und -optimierung können Effizienz und Zuverlässigkeit der erstellten Anwenderprogramme wesentlich erhöht werden. Erst hierdurch werden die für die Wirtschaftlichkeit der Laseranlagen benötigten, kurzen Programmierzeiten und die notwendige Flexibilität, etwa für die Prototypen- und Kleinserienherstellung, erreicht. Allerdings sind derartige Planungswerkzeuge zur Programmerstellung für die 3D-Lasermikrobearbeitung bislang nicht verfügbar.

Insgesamt ergibt sich ein Handlungsbedarf für die Entwicklung von rechnergestützten Methoden und Verfahren zur Anlagenprogrammierung für die räumliche Lasermikrobearbeitung. Dies bedeutet, daß effiziente und leistungsfähige Planungsalgorithmen zu erstellen sind, die die Programmierzeiten reduzieren und die Planungsqualität steigern. Vor diesem Hintergrund scheint auch die Entwicklung eines Planungssystems sinnvoll, welches sich insbesondere an den Fähigkeiten des Mikroeinsatzes orientiert.

3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Methoden zur Bearbeitungsplanung für die Anlagenprogrammierung im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung zu entwickeln. Neben einer Reduzierung der Planungszeiten durch eine automatisierte Programmerstellung soll hiermit zusätzlich eine Flexibilisierung der Fertigung im Hinblick auf ein breites Werkstückspektrum, eine Unterstützung für die Prototypen- und Kleinserienfertigung sowie eine effektive Integration der Laseranlagen für die räumliche Mikrobearbeitung in die Prozeßkette erreicht werden (Bild 10).

Kennzeichnend für die Laseranlagen im Bereich der räumlichen Mikrobearbeitung ist die Verwendung eines Scansystems in Kombination mit einer Handhabungskinematik, welche die Relativbewegungen zwischen Werkstück und Scansystem ausführt. Eine wesentliche Aufgabe für die Methoden liegt daher darin, den Fertigungsvorgang so zu planen, daß die Bearbeitungsvorteile des Scansystems vollständig ausgenutzt werden.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Erarbeitung von Planungsmethoden, die auf der Grundlage von rechnerinternen Modellen den Bearbeitungsvorgang so zu optimieren haben, daß die Potentiale der redundanten und multiplen Kinematik vollständig genutzt werden. Von den Algorithmen ist zudem sicherzustellen, daß alle Bearbeitungspositionen erreicht werden, Kollisionsfreiheit besteht und das Überschreiten anlagentechnischer und technologischer Grenzen automatisch erkannt wird.

Die Methoden für die Bearbeitungsplanung sollen als Bestandteil eines Planungssystems

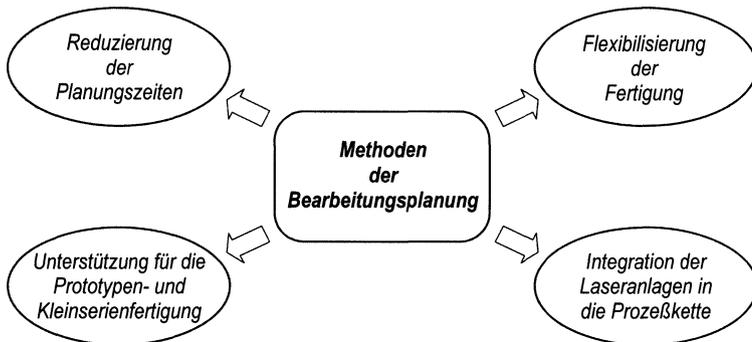


Bild 10: Auswirkungen der Methoden der Bearbeitungsplanung für die 3D-Lasermikrobearbeitung

für die 3D-Lasermikrobearbeitung dienen, mit dem die Anwenderprogramme effizient und automatisiert erstellt werden können. Zusammen mit einer graphisch-dynamischen Simulation des Bearbeitungsvorgangs können die räumlichen Bewegungsabläufe der Anlagenkinematiken sowie die ansonsten für den Bediener nicht-transparenten Mikrobearbeitungsvorgänge visualisiert und verifiziert werden. Ein konkreter Anwendungsfall soll die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methoden und rechnerinternen Modelle aufzeigen.

4 Gesamtkonzept der Bearbeitungsplanung

4.1 Aufgaben und Anforderungsprofil

Aus der im vorigen Kapitel festgelegten Zielsetzung resultiert die Aufgabe, geeignete Methoden und Verfahren für die Bearbeitungsplanung zu entwickeln, die die rechnergestützte automatische Programmerstellung für die 3D-Lasermikrobearbeitung ermöglichen. Aus dieser Aufgabenstellung lassen sich unterschiedliche Anforderungen ableiten, die im folgenden dargestellt werden:

- Aus wirtschaftlicher Sicht besteht die Anforderung, optimierte Anlagenprogramme hinsichtlich der Bearbeitungsdauer zu erzeugen. Innerhalb der Methoden zur Bearbeitungsplanung müssen daher effiziente und leistungsfähige Algorithmen realisiert werden, die einerseits die Verfahrenwege minimieren sowie andererseits die vorhandenen Potentiale der Anlagenkinematik ausnutzen können. Die Methoden sollen die Kombination von Scansystem und Handhabungseinheit berücksichtigen und möglichst unabhängig von der verwendeten Kinematik sein.
- Darüber hinaus ist die Kollisionsfreiheit der generierten Anlagenprogramme sicherzustellen. Zum einen müssen hierzu Kollisionen als solche erkannt werden, zum anderen sind in den Methoden für die Bearbeitungsplanung Ausweichstrategien zu hinterlegen. Diese Strategien haben die Aufgabe, den Kollisionskonflikt aufzulösen, indem andere Eingriffsverhältnisse berechnet werden, bei denen sich die Kollisionspartner umgehen.
- Für die Erstellung von aufgaben- und technologiegerechten Anlagenprogrammen ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Einbindung bzw. die Ergänzung von prozeßtechnischen Informationen von Bedeutung. Hierdurch besteht die Forderung, eine Abbildung der fertigungsbeschreibenden Daten zu realisieren, indem das Problem der Verbindung von geometrie- und fertigungsbeschreibenden Daten in den Datenmodellen gelöst wird.
- Eine weitere Anforderung besteht in der Notwendigkeit, aufgrund der geringen Prozeßeinsicht im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung, eine graphisch-dynamische Simulation des Bearbeitungsvorgangs zu ermöglichen, die eine Programmverifikation erlaubt. In diesem Zusammenhang soll sich die Anlagenprogrammierung nicht nur auf die automatisierte Umsetzung der Werkstück- und Konturdaten in ein Anwenderprogramm beschränken. Einem Bediener soll auch die Möglichkeit gegeben werden, jederzeit eine Modifikation, etwa an den Bearbeitungskonturen oder an den fertigungsbeschreibenden Daten, vornehmen zu

können. Die vollzogenen Änderungen sind von den Planungsmethoden bei der Bearbeitungsplanung zu berücksichtigen.

4.2 Modelle und Methoden

4.2.1 Datenmodelle und Modellierung

Eine Voraussetzung zur Erfüllung der genannten Anforderungen besteht in der Bereitstellung geeigneter Datenmodelle, die von den zu realisierenden Methoden zu ihrer Aufgabenerfüllung benötigt werden. Die Datenmodelle übernehmen die Aufgabe, die räumliche Nachbildung aller an der Bearbeitungsaufgabe beteiligten Komponenten, ihre Beziehung untereinander sowie die für ihre Bearbeitung notwendigen technologischen und vorgangsbeschreibenden Informationen zu definieren. Dazu sind in den Modellen die Informationen über die Geometrie sowie die funktionalen und technologischen Eigenschaften der verschiedenen Komponenten in Form einer rechnerinternen Darstellung (RID) abgelegt. Im Bild 11 sind die für die Methoden der Bearbeitungsplanung zur Aufgabenerfüllung notwendigen Modelle dargestellt.

Grundvoraussetzung für die rechnergestützte Bearbeitungsplanung ist die Existenz eines Modells des zu bearbeitenden Werkstücks, da es für fast alle systeminternen Planungsteilschritte herangezogen werden muß, wie etwa für die Kollisionskontrolle. Das *Werkstückmodell* enthält in erster Linie ein Geometriemodell des realen Werkstücks und beschreibt damit seine Größe und Form. Darüber hinaus sind im Werkstückmodell auch die Bearbeitungskonturen sowie die technologischen Eigenschaften, wie Werkstückwerkstoff u.ä., enthalten. Neben einer geeigneten Ablageform der Werkstückgeometrie spielt insofern auch die Einbindung von Technologieinformationen in das Werkstückmodell eine zentrale Rolle.

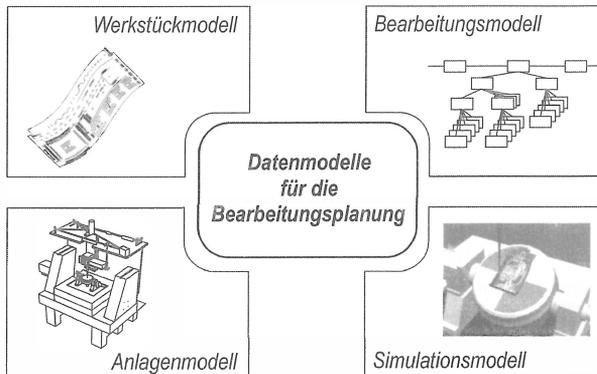


Bild 11: Datenmodelle für die Methoden der Bearbeitungsplanung

Das *Anlagenmodell* wird primär zur Kollisionsberechnung verwendet und besteht im wesentlichen aus einer rechnerinternen geometrischen Abbildung der Anlage sowie aller Anlagenkomponenten. Die Abbildung der Laseranlage und aller für die Bearbeitung notwendigen Anlagenkomponenten erfolgt mittels geometrischer Objekte. Neben den rein statischen Geometriedaten enthält das Anlagenmodell auch die rechnerinterne Abbildung der Anlagenkinematik [64]. Hierzu werden die kinematischen Strukturen der einzelnen Achsen als Geometrieobjekte abgelegt und die Kinematikbewegungen softwaretechnisch nachgebildet, indem zusätzliche Informationen zur Beschreibung der Kinematik im Anlagenmodell hinterlegt werden.

Das *Simulationsmodell* dient der graphisch-dynamischen Darstellung der Bearbeitung sowie der Kollisionskontrolle. Hierfür greift das Simulationsmodell insbesondere auf die geometrischen Informationen in den Werkstück- und Anlagenmodellen zurück, wobei sich häufig das Simulationsmodell mit dem Werkstück- und Anlagenmodell die gleichen geometrischen Daten teilt [65,66]. Im Hinblick auf eine möglichst effiziente Darstellung auf dem Bildschirm basieren die geometrischen Informationen aber auf einer polygonalisierten Geometriedarstellung, mit der Folge, daß diese approximierte Darstellung auch für die Geometriedefinition der Anlage und insbesondere auch für die des Werkstücks verwendet wird, was zu Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung führen kann.

Das *Bearbeitungsmodell* ist ein rechnerinternes Abbild des Bearbeitungsvorgangs, in dem die für die Werkstückbearbeitung notwendigen Teilschritte hinterlegt sind. Die in diesem Modell hinterlegten Daten werden von den Methoden der Bearbeitungsplanung erzeugt und bestehen aus berechneten Bewegungsbahnen sowie technologischen Informationen. Die Bewegungsbahnen, d.h. die ermittelten Verfahrenswege, werden in geometrischer Form und als Sequenz von Start- und Endpunkten von Kinematikbewegungen, zusammen mit der Interpolationsart der Kinematikbewegung, gespeichert. Die datentechnische Ablage dieser Informationen erfolgt generell in einer steuerungsunabhängigen Form.

Die Anforderungen, die an alle rechnerinternen Modelle gestellt werden, beziehen sich in erster Linie auf eine möglichst präzise Abbildung der Bearbeitungsaufgabe sowie eine geeignete Ablage der Modellinformationen. Da auf die darin enthaltenen Informationen häufig zugegriffen wird, sie interpretiert und gegebenenfalls sogar manipuliert werden müssen, sind die Datenmodelle möglichst effizient rechnerintern abzubilden. Bei der Modellierung ist daher die rechnerinterne Abstraktion so durchzuführen, daß alle für die Bearbeitungsaufgabe notwendigen realen Komponenten möglichst genau abgebildet, aber nicht aufwendiger als nötig beschrieben werden, um die Planungszeiten gering zu halten.

4.2.2 Bearbeitungsplanung und Programmgenerierung

Um aus den Bearbeitungskonturen des Werkstückmodells ein ausführbares und bearbeitungsoptimiertes Anwenderprogramm zu erzeugen, sind Methoden aus dem Bereich der Bearbeitungsplanung zu entwickeln, die diese Aufgabe übernehmen. Sie erstellen alle für die Anwenderprogrammerzeugung erforderlichen Informationen auf Grundlage der gegebenen Datenmodelle, indem sie aus den Bearbeitungskonturen eine Sequenz von

Achsstellungen und Schaltanweisungen unter Berücksichtigung der technologischen Randbedingungen berechnet. Ihre Ergebnisse hinterlegen sie im Bearbeitungsmodell, so daß diese Informationen auch anderen Datenmodulen und Methoden zur Verfügung stehen.

Dabei soll mit den Algorithmen ein möglichst breites Werkstückspektrum bearbeitet werden können, sowohl mit einfachen als auch räumlich komplexen und umfangreichen Bearbeitungskonturen. Ein weiterer Aspekt ist die Notwendigkeit einer kurzen Berechnungszeit, um möglichst schnell bei einer vom Bediener vollzogenen Änderung eine erneute Bahnplanung durchführen zu können. Dies unterstützt die iterative Prozeßoptimierung, wie sie beispielsweise für das Rapid-Prototyping von Werkstücken vorausgesetzt wird.

Bei der Berechnung ist von den Planungsalgorithmen sicherzustellen, daß alle Bearbeitungspositionen erreicht sowie Kollisionen festgestellt und umgangen werden. Darüber hinaus ist auch das Überschreiten anlagentechnischer und technologischer Grenzen zu erkennen und eine Optimierung der Anlagenbewegungen hinsichtlich der Bearbeitungsdauer vorzunehmen. Die Optimierung der Anwenderprogramme, verbunden mit einem möglichst hohen Qualitäts- und Genauigkeitsanspruch, erhöht die Anforderungen, die an die Planungsalgorithmen gestellt werden. Für die Optimierung der Programme müssen insbesondere die Potentiale der betrachteten Anlagenkinematiken gezielt genutzt werden, indem eine optimale aufgaben- und kinematikspezifische Verteilung und Zuordnung der Bearbeitungsaufgabe auf die beteiligten Einzelkinematiken bzw. redundanten Freiheitsgrade vorgenommen wird.

Nach einer durchgeführten Bearbeitungsplanung ist die im Bearbeitungsmodell hinterlegte, steuerungsunabhängige Darstellung des Bearbeitungsablaufs in einem abschließenden Schritt in ein steuerungsspezifisches Anwenderprogramm zu übersetzen. Hierzu werden die im Modell enthaltenen bewegungs- und technologielevanten Daten in Form von Bewegungs- und Steuerungsanweisungen in die Syntax der jeweiligen Steuerung umgesetzt. Das so erstellte Programm wird anschließend an die Laseranlage übertragen und dort ausgeführt.

4.2.3 Simulation und Kollisionskontrolle

Die Simulation dient primär zur Bewegungsnachbildung der Anlagenkinematik. Zum einen überprüfen die Methoden der Bearbeitungsplanung mit der Simulation ihre berechneten Bewegungsabläufe bzw. Achsstellungen auf ihre Kollisionsfreiheit, zum anderen kann damit eine einzelne Kinematikbewegung oder sogar die gesamte Bearbeitung dem Benutzer visualisiert werden. Für die Kollisionskontrolle werden die im Bearbeitungsmodell enthaltenen Informationen interpretiert und in simulierte Kinematikbewegungen umgesetzt. Die Kollisionsprüfung besteht nun darin, bei der simulierten Bewegung alle Geometrieobjekte in der Simulation untereinander auf eine Durchdringung hin zu überprüfen.

Die Aufgabe der rechnerinternen Kollisionskontrolle kann damit in die Teilaufgaben

- Darstellung der Geometrieobjekte in ihrer aktuellen Position (Achsstellung),

- Nachführen aller durch die Bewegungsanweisung betroffenen geometrischen Objekte und
- Test auf Kollision

gegliedert werden. Für eine präzise Kollisionsprüfung müssen alle kollisionsrelevanten Komponenten der Anlage in der Simulation nachgebildet sein. Dabei greift die Simulation auch auf das Werkstückmodell zurück, um ungewollte Kollisionen mit dem Werkstück feststellen zu können. Zur Reduzierung der für die Kollisionsrechnung benötigten Rechenzeit sind bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen entworfen worden [67-70].

Die Visualisierung der Bearbeitung erfolgt nach der Bearbeitungsplanung in einer graphisch-dynamischen Simulation und vermittelt dem Bediener eine realitätsnahe Darstellung des Bearbeitungsprozesses. Dies ist notwendig, da einerseits die Prozeßeinsicht des Bearbeitungsvorgangs in der Mikrobearbeitung gering ist, sowie andererseits die räumlichen Bewegungsabläufe der betrachteten Anlagenkinematiken kaum mehr ohne eine geeignete Darstellungsform zu verifizieren sind. Dies impliziert auch die Möglichkeit zur schritt- oder abschnittsweisen Ausführung des Bearbeitungsablaufs. Mit dieser Unterstützung kann ein Bediener einfacher manuelle Änderungen am Bearbeitungsablauf vornehmen, als dies sonst der Fall wäre.

4.3 Informationstechnische Integration

Neben den Modellen und Methoden der Bearbeitungsplanung ist auch deren informationstechnische Integration von Bedeutung. Die Aufgabe besteht darin, die Einsatzmöglichkeiten des Planungssystems möglichst universell, gleichzeitig aber flexibel konfigurierbar zu gestalten. Eine günstige Aufteilung wird erreicht, indem voneinander unabhängige Funktionen in einzelne Module zusammengefaßt werden. Ein modular aufgebautes System vereinigt Funktionalität und hohe Flexibilität. So können die Module separat weiterentwickelt, neue erstellt oder externe Module integriert und genutzt werden, ohne den Systemaufbau oder andere Module zu beeinflussen. Darüber hinaus ist es möglich, auf die Ergebnisse der einzelnen Module zuzugreifen und diese anderweitig weiterzuverarbeiten.

Für die genannten Funktionalitäten und Modelle zur Erfüllung der Planungsaufgabe sind daher einzelne Module vorzusehen: für die Bearbeitungsplanung, die Simulation, die Kollisionskontrolle, die rechnerinternen Datenmodelle, für die Importfunktionen zur Integration des Systems in die Prozeßkette sowie für einen oder mehrere Postprozessoren für die steuerungsabhängige Programmerzeugung. Es bietet sich dabei an, alle rechnerinternen Datenmodelle in einem Modul zusammenzufassen, denn je nach Planungsstufe greifen unterschiedliche Funktionsmodule auf die gleichen Datenmodelle zurück. So wird etwa das Werkstückmodell zum einen vom Bearbeitungsmodul zur Ableitung der Laserbahnen und zum anderen für das Simulationsmodell zur Visualisierung benötigt. Mit dem genannten Ansatz ist somit eine redundanzfreie Datenhaltung gewährleistet.

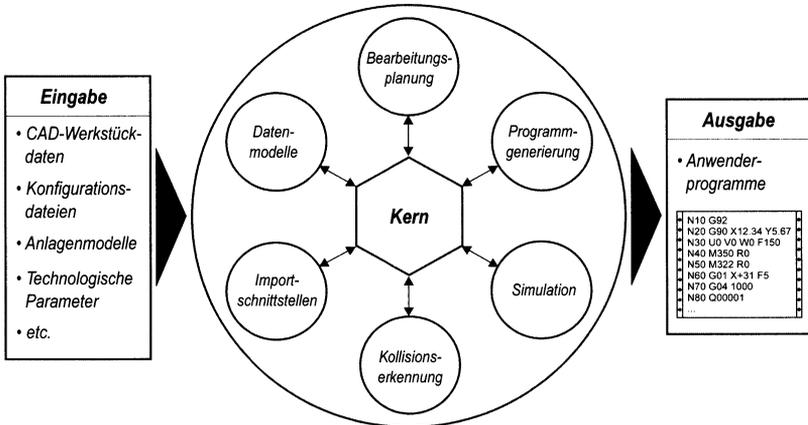


Bild 12: Integration der Module in ein Gesamtsystem

Für die anschließende Verwendung der Module stehen mehrere Integrationslösungen zur Auswahl, die sich in ihrem Aufbau und der Funktionalität maßgeblich unterscheiden:

- Die Module werden zu Gruppen zusammengefaßt, die datentechnisch voneinander unabhängig sind, und jeweils als eigenständiges Programm realisiert. Der Datenaustausch findet über definierte Schnittstellen statt.
- Alle Module werden zu einem Gesamtsystem zusammengefaßt und um eine graphische Benutzeroberfläche erweitert.
- Die Module werden in ein bestehendes Programm integriert, z.B. einem CAD-System, und erweitern dieses System um die Möglichkeit zur Bearbeitungsplanung für die 3D-Lasermikrobearbeitung.

Der Vorteil bei der ersten Integrationslösung besteht darin, daß die einzelnen Programme getrennt voneinander verwendet werden können. So kann etwa eine rechenintensive Bearbeitungsplanung durchgeführt werden, während auf einem anderen Rechner bereits der Datenimport für das nächste Werkstück erfolgt. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, daß sich der ständige Datenaustausch über Schnittstellen als unkomfortabel und wenig bedienungsfreundlich darstellt.

Günstiger ist es daher, eine Integration aller Module in ein Gesamtsystem oder in ein bereits bestehendes Programm vorzunehmen (Bild 12). Die Vorteile dieser Integrationslösungen liegen in der einheitlichen Benutzerschnittstelle und dem reduzierten Bedienungsaufwand. Für die Integration in ein bereits bestehendes Programm spricht, daß bestehende Funktionalitäten übernommen und von den Modulen genutzt werden können.

Handelt es sich dabei um ein CAD-System, so kann die Werkstückkonstruktion und die Bearbeitungsplanung in einem einzigen Programm vorgenommen werden und der Datenaustausch über Ex- und Importschnittstellen entfällt. Des weiteren ist auch die

Erstellung der Anlagenmodelle mit der CAD-Funktionalität des Programms möglich. Die erstellte Anlagengeometrie kann anschließend in das Anlagenmodell übernommen werden und steht damit auch den Planungsmodulen zur Verfügung. Wird als Basissystem ein Simulationssystem herangezogen, so können die Funktionalitäten für Bewegungssimulation und Kollisionskontrolle genutzt werden und die Implementierung dieser Module kann entfallen.

5 Datenmodelle der Bearbeitungsplanung

5.1 Werkstückmodellierung

Für die datentechnische Ablage aller zum Werkstück gehörenden Informationen muß neben einer rechnerinternen dreidimensionalen Darstellung der Werkstückgeometrie auch eine effiziente Ablage der Bearbeitungskonturen und technologischen Daten im Werkstückmodell erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein Werkstückmodell entwickelt und realisiert, daß alle für die Bearbeitungsplanung notwendigen Informationen in einem Modell integriert und auf die Bedürfnisse der Lasermikrobearbeitung abgestimmt ist.

5.1.1 Geometrieablage

Die Ablage der Werkstückgeometrie kann im Werkstückmodell in unterschiedlicher Form erfolgen. Grundsätzlich wird bei der Beschreibung dreidimensionaler Objekte zwischen dem Kanten-, dem Flächen- und dem Volumenmodell unterschieden. Eine eindeutige Beschreibung der Geometrie ist aber nur mit dem Flächen- oder Volumenmodell möglich. Beim Flächenmodell, auch B-Rep-Modell (*boundary representation*) genannt [71], wird das reale Objekt rechnerintern durch seine äußeren Begrenzungsflächen beschrieben. Im Gegensatz hierzu erfolgt im Volumenmodell die Beschreibung durch Dekomposition des Objekts in die geometrischen Grundkörper (Quader, Kugel, Zylinder usw.), das daher auch CSG-Modell (*constructive solid geometry*) genannt wird. Beide Beschreibungsformen, das Flächen- und das Volumenmodell, haben ihre jeweiligen Vorzüge. Im Hinblick auf das geplante Anwendungsgebiet wurde das Flächenmodell gewählt, da es gegenüber dem CSG-Modell eine Reihe von Vorteilen besitzt, die in der Literatur bereits umfassend behandelt worden sind [72-74].

Das für die Ablage der Werkstückgeometrie implementierte Flächenmodell ist durch die Trennung in geometrische und topologische Elemente charakterisiert (Bild 13). Die geometrischen Elemente beschreiben die Lage und Form von Objekten im Raum, die topologischen die Beziehungen der geometrischen Objekte untereinander. Zudem sind die topologischen Elemente hierarchisch geordnet: ein Körper wird durch einen oder mehrere Flächenverbände beschrieben, die jeweils aus einer oder mehreren Flächen bestehen können. Die Flächen verweisen auf Konturzüge, welche die Außen- und Innenkonturen der Fläche definieren. Die wiederum bestehen aus einzelnen Kanten, die durch Punkte definiert sind. Punkte sind topologische Begrenzungselemente von Kanten; durch sie werden die Kanten in ihrem Definitionsbereich eingeschränkt.

Die topologischen Elemente enthalten keinerlei Geometrieinformationen, sie verweisen jeweils auf die ihnen zugehörigen geometrischen Elemente. Eine Position beschreibt einen

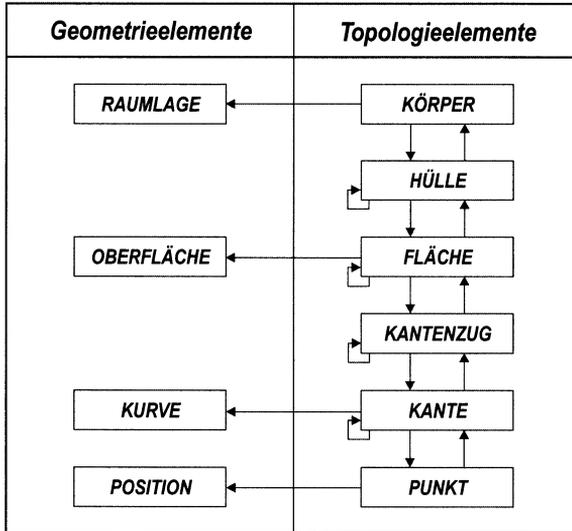


Bild 13: Aufbau des verwendeten Flächenmodells zur Ablage der Werkstückgeometrie

Punkt im Koordinatensystem, der durch seine (x,y,z) -Koordinate im Raum eindeutig definiert ist. Eine Kurve legt die geometrische Verbindung zwischen zwei Punkten fest und ist im einfachsten Fall eine Gerade. Die Flächen sind die zentralen Informationsträger. Sie definieren die geometrische Gestalt des Modells und werden durch ihre topologischen Begrenzungselemente (Kanten) hinsichtlich ihres Definitionsbereichs beschränkt. Die Flächenorientierung ist durch den Normalenvektor eindeutig festgelegt und weist vom Material des Körpers weg, so daß damit implizit auch die Materialsituation festgelegt ist. Neben den geometrischen und topologischen Elementen ist auch ein Hilfselement im Flächenmodell enthalten, daß die Lage des Körpers bzw. Werkstücks im Raum definiert (*Raumlage*).

5.1.2 Ablage der Bearbeitungskonturen

Um eine effiziente datentechnische Ablage der Bearbeitungskonturen innerhalb des Werkstückmodells zu erreichen, wurde das Flächenmodell erweitert und um Elemente für die Aufnahme der Bearbeitungskonturen ergänzt. Eine Ablage der Bearbeitungskonturen konnte auch im Flächenmodell selbst erfolgen, indem die Kanten- und Kantenzug-Elemente genutzt werden. Diese Elemente sind aber immer im Zusammenhang mit einer übergeordneten Fläche definiert, während die Bearbeitungskonturen nicht in jedem Fall an eine Fläche gebunden sein müssen.

Um die Definition der Bearbeitungskonturen auch unabhängig von Flächen zu ermöglichen, wurde daher neben der topologischen Hierarchie eine weitere Hierarchie realisiert (Bild 14). Die Hierarchie der Bearbeitungskonturen besteht aus zwei Ebenen, der Konturmenge, die eine beliebig große Anzahl von Bearbeitungskonturen in Form einer Liste enthält und den einzelnen Bearbeitungskonturen selbst. Der Verweis auf die Konturmenge wird durch den Körper gehalten. Für die geometrische Definition einer Bearbeitungskontur verweist das Element ‚Kontur‘ zurück auf das Topologieelement ‚Kantenzug‘, da die Eigenschaften des Elements ‚Kantenzug‘ übernommen werden können und hierdurch der Aufwand für eine eigene datentechnische Ablage der Konturgeometrie entfällt. Durch die genannten Erweiterungen konnte das Werkstückmodell dahingehend modifiziert werden, daß es nun parallel Flächeninformationen und Bearbeitungskonturen beschreibt.

5.1.3 Technologieanbindung

Zur vollständigen Beschreibung eines Werkstücks gehören neben der geometrischen Beschreibung des Werkstücks auch technologische Angaben. Die technologischen Angaben, welche die nicht-geometrischen Eigenschaften des Werkstücks beschreiben, wie etwa den Werkstückwerkstoff, wurden hierfür mit den anderen Elementen des Flächenmodells verknüpft. Durch die Verbindung mit technologischen Elementen entstand ein Werkstückmodell, das alle Teilfunktionen der Bearbeitungsplanung optimal unterstützt. Die Vorteile dieser gewählten Lösung sind:

- Die Datenhaltung erfolgt zentral, in einem einzigen Modell.

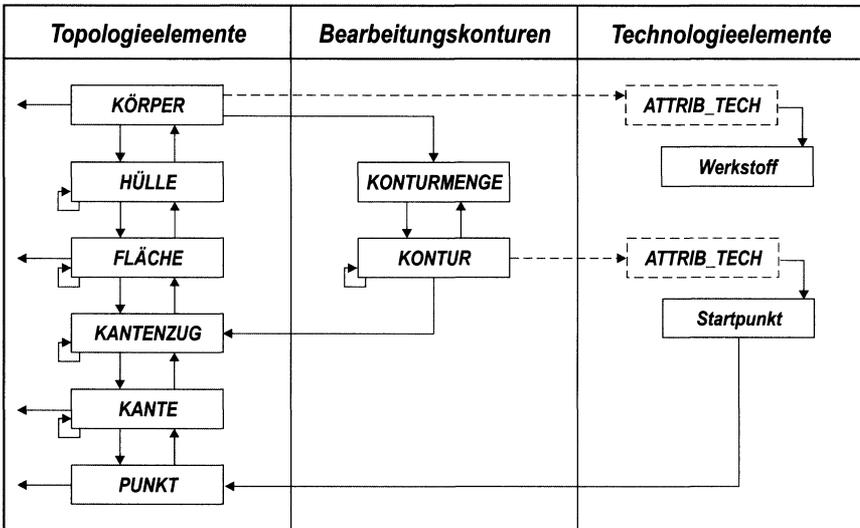


Bild 14: Erweiterung des Flächenmodells um Bearbeitungskonturen und Technologieinformationen

- Änderungen am Werkstückmodell wirken sich auch auf die technologischen Eigenschaften aus. Werden etwa Flächen oder Bearbeitungskonturen gelöscht, so gilt dies auch für die damit verbundenen technologischen Elemente.
- Technologische Elemente können auf ein oder mehrere Elemente des Werkstückmodells zurückverweisen und damit technologisch – nicht nur geometrisch – zusammengehörige Elemente gruppieren und so Gruppierungsfunktionen übernehmen. Ein einfaches Beispiel hierfür ist in Bild 14 dargestellt. Hier verweist das technologische Attribut ‚Startpunkt‘ auf einen vom Benutzer vorgegebenen Punkt, der bei einer geschlossenen Bearbeitungskontur den Start- und Endpunkt der Bearbeitung explizit kennzeichnet.
- Freidefinierbare technologische Eigenschaften erweitern das Flächenmodell zum Produktmodell.

Die datentechnische Integration der technologischen Eigenschaften in das Werkstückmodell wird realisiert, indem die entsprechende Eigenschaft über ein Attribut mit einem anderen Element verknüpft wird, für dessen Bereich es gelten soll. Auf diese Weise wird neben der Integration aller Werkstückdaten in ein Gesamtmodell auch die Beziehung zwischen der technologischen Eigenschaft und dem Bereich, für den diese Eigenschaft gilt, eindeutig definiert. Ein technologisches Element des gleichen Typs kann im Werkstückmodell mehrfach vorkommen, nicht jedoch mehrere Technologieelemente gleichen Typs an ein einzelnes Element gekoppelt sein. Dabei gilt, daß technologische Elemente auf einer niedrigeren Ebene technologische Elemente gleichen Typs auf einer höheren Ebene überschreiben.

Das Attribut als Bindeglied zwischen den Elementen übernimmt dabei die Aufgaben, die zur Verwaltung der technologischen Eigenschaft notwendig sind, wie etwa die Datenhaltung der Elemente in einer Liste oder das Sichern und Wiederherstellen der technologischen Informationen in einer Datei. Durch die lose Kopplung der Elemente untereinander wird erreicht, daß neue technologische Elemente hinzugefügt oder entfernt bzw. geändert und erweitert werden können, ohne programmtechnisch andere Elemente und ihre Definition zu beeinflussen.

5.1.4 Geometrieimport

Für eine effektive Integration in die Prozeßkette muß die Übernahme von Werkstückdaten aus dem CAD-System erfolgen. Damit ist die datentechnisch durchgängige Unterstützung, insbesondere notwendig für das Rapid-Prototyping, innerhalb der Fertigung sichergestellt. Die hierdurch erzielten Vorteile sind Kostenersparnis in der Fertigungsvorbereitung, Fehlervermeidung sowie die Verkürzung der Durchlaufzeit entlang der Prozeßkette. Beim Datenaustausch können allerdings erhebliche Probleme auftreten. Die Werkstückgeometrie wird in unterschiedlichen CAD-Systemen auch unterschiedlich gehalten, da die Systeme verschiedene Datenstrukturen und mathematische Ansätze zur Geometrieablage besitzen.

Dies bedeutet, daß eine Umsetzung der Modelldaten stattfinden muß. Um den Austausch zu ermöglichen, bieten die CAD-Systeme daher entsprechende Datenschnittstellen an. Obwohl eine Reihe von Datenformaten entwickelt worden sind, hat sich bislang eine gleichermaßen kompatible geometrische Repräsentation der gestaltbeschreibenden Daten für den Austausch von Geometriemodellen noch nicht etablieren können. Ein Datenaustausch über die Standardformate ist aber in der Regel mit Ungenauigkeiten verbunden, die infolge der Umwandlung der Geometrielemente in ein unterschiedliches Datenformat auftreten. Neben den Standardformaten wie IGES, VDAFS oder STEP existieren daher auch Direktschnittstellen für CAD-Systeme, wie CATIA, Pro/E oder SolidWorks.

Um die CAD-Werkstückdateien übernehmen zu können, müssen spezielle Konvertierungsprogramme im Planungssystem enthalten sein, welche die Datenstrukturen des CAD-Systems direkt oder über ein neutrales Standardformat in die eigenen Datenstrukturen umwandeln. Erst mit den Importfunktionen wird die Einbindung in die Prozeßkette erreicht und die Übernahme der CAD-Daten aus den vorliegenden Planungsbereichen ermöglicht.

5.2 Anlagenmodellierung

Die rechnerinterne Abbildung der Bearbeitungsplanung setzt neben dem Werkstückmodell auch die Modellbildung der Anlage voraus. Gegenüber dem starren Werkstückmodell unterscheidet sich das Anlagenmodell vor allem durch die erforderliche Bewegungsabbildung der Anlagenkinematik. Eine wesentliche Aufgabe bestand daher darin, neben der Anlagengeometrie auch die Anlagenkinematiken hinsichtlich ihrer Geometrie und ihrer Bewegungscharakteristik abzubilden. Die Modellierung von Robotern stellt eine in der Literatur bereits häufig behandelte Thematik dar [75-77]. Für die Anlagenmodellierung wurden daher die rechnerinternen Modelle für die verschiedenen Scansysteme – sowohl mit als auch ohne 3D-Fokuslagensteuerung – sowie für das 5-Achs-Handhabungssystem der Portalanlage aus Abschnitt 2.2.5 entwickelt.

5.2.1 Anlagengeometrie

Die Gestalt der Anlage wird durch geometrische Körper beschrieben, welche die äußere Form und das Aussehen aller relevanten Teile der Anlage und Anlagenumgebung nachbilden. Die geometrische Nachbildung der Anlage ist notwendig, um eine rechnerbasierte Kollisionserkennung durchführen zu können. Allerdings werden aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzung andere Anforderungen an das geometrische Anlagenmodell gestellt, als an das Werkstück.

Für eine effiziente Kollisionserkennung mußte gegenüber dem Werkstückmodell eine vereinfachte Geometriedarstellungsform gewählt werden. Hierzu wurde die reale Anlagengeometrie rechnerintern nachgebildet, durch ein Facetten- bzw. Polygonmodell angenähert und in das Anlagenmodell übernommen. Gegenüber einer Freiformflächendarstellung wird durch die Verwendung eines Facetten- oder Polygonmodells die Kollisionsrechnung in erheblichen Maße verkürzt und vereinfacht.

5.2.2 Kinematikmodellierung

Außer den geometrischen Daten gehört auch die Kinematiknachbildung zum Anlagenmodell. Eine Anlagenkinematik setzt sich in der Regel aus mehreren Gliedern zusammen. Die Verbindungen zwischen den Gliedern wird durch Achsen definiert, die auch deren räumliche Orientierung zueinander beschreiben. Sie lassen sich in zwei unterschiedliche Typen einteilen: rotatorische und translatorische Achsen. Eine kinematische Kette bezeichnet nun eine zusammenhängende Struktur, bei der mehrere Glieder durch Achsen miteinander verbunden sind. Jede kinematische Kette ist dabei durch ihren Arbeitsraum und ihre Bewegungsmöglichkeit charakterisiert.

Für die Nachbildung der realen Anlagenkinematik sind alle in der Laseranlage vorhandenen kinematischen Ketten in geometrischer als auch kinematischer Hinsicht rechnerintern abzubilden. Während das Geometriemodell der Anlage bereits die geometrische Form der kinematischen Ketten beschreibt, muß für die Nachbildung der Achsen die Beziehung zwischen den einzelnen Gliedern der Kette definiert werden. So ist für jede Achse der Typ (Rotations- oder Translationsachse), die räumliche Lage, die Verfahrrichtung sowie der zulässige Bewegungsbereich anzugeben. Um die kinematischen Beziehungen abzubilden, besteht das Kinematikmodell aus einer Datenstruktur, die für jedes Glied der kinematischen Kette auf die dazugehörige Geometrie verweist sowie die genannten charakteristischen kinematischen Daten der jeweiligen Achse enthält. Dieser Ansatz kann für alle Mehrkörpersysteme angewandt werden, deren Elemente durch Translations- und Rotationsachsen miteinander verbunden sind.

Eine Kinematikbewegung in der Simulation erfolgt nun, indem die vorgegebene Bewegung durch Translation und Rotation mit den daran beteiligten Geometrieobjekte durchgeführt und die Ausführbarkeit mit den kinematischen Daten verifiziert wird. Mit der Anlagegeometrie und der Kinematik kann somit auch die Erreichbarkeit der Bearbeitungsstellen überprüft werden. Die Bewegungsabläufe bestehen dabei prinzipiell aus einer Vielzahl von einzelnen, aufeinanderfolgenden Haltungen der betreffenden Kinematik (repräsentiert durch die jeweilige Gesamtheit der einzelnen Achswerte).

Neben der rein datentechnischen Modellierung der Anlagenkinematiken sind auch Transformationsberechnungen zur Herleitung ihrer kinematischen Bewegungsabläufe erforderlich. Die Transformationsgleichungen haben die Aufgabe, die Relation zwischen den Achswerten und denen des kartesischen Raums herzustellen. Diese Funktionalität ist insbesondere für die Methoden der Bearbeitungsplanung notwendig, die aus den Bearbeitungskonturen des Werkstücks die für die Bearbeitung durchzuführenden Bewegungsabläufe der einzelnen kinematischen Ketten zu berechnen haben.

Zum einen ist aus den gegebenen Gelenkwerten die Haltung des letzten Elements (Werkzeug bzw. TCP) der betrachteten kinematischen Kette zu bestimmen, zum anderen sind aus einer raumfesten Koordinate die der jeweiligen Haltung zugehörigen Achswerte zu ermitteln. Die erste Berechnung wird als Vorwärtstransformation, die Umkehrrelation dementsprechend als Rücktransformation oder auch als inverse Kinematik bezeichnet. Während die Haltung des letzten Elements der kinematischen Kette, d.h. die Position und

Orientierung des Endeffektors, durch die Vorgabe der Achswerte einfach bestimmt werden kann, stellt die Rücktransformation das eigentliche Problem dar.

In Abhängigkeit von der jeweiligen kinematischen Kette, d.h. der Anzahl, Art und Anordnung der Achsen, existieren für die Rücktransformation keine, eine, mehrere oder unendlich viele Lösungen. Ganz im Gegensatz zur Vorwärtstransformation können daher keine allgemein gültigen Lösungskonzepte aufgestellt werden. Im Fall, daß keine Lösung gefunden werden kann, liegt die raumfeste Koordinate außerhalb des Arbeitsbereichs der Anlagenkinematik. Existieren mehrere oder unendlich viele Lösungen, ist die Kinematik in der Lage, die raumfeste Koordinate durch mehrere Achsstellungen zu erreichen. Durch die Angabe von zusätzlichen Randbedingungen kann die Lösungsvielfalt aber in eine eindeutige Lösung überführt werden.

5.2.3 Modellierung der Scansysteme

Die Modellierung des Scansystems ist für die Kollisionserkennung aber auch für die Visualisierung notwendig und erfordert daher zunächst die Nachbildung in geometrischer Hinsicht. Eine Kollision zwischen dem Werkstück und dem Scankopf ist aufgrund des großen Bearbeitungsabstands eher unwahrscheinlich. Dies gilt auch bei der Handhabung durch einen Roboter, der das Werkstück oder das Scansystem führt. Aufgrund des Bearbeitungsabstands kann es allerdings zu einer Kollision zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück kommen, d.h. zu einer ungewollten Abschattung des Laserstrahls, etwa durch Versteifungselemente des Werkstücks. Die Modellierung des Scansystems machte insofern eine Betrachtung des aus dem Scankopf austretenden Laserstrahls bis zum Auftreffen auf dem Werkstück als Bestandteil der Kollisionserkennung erforderlich.

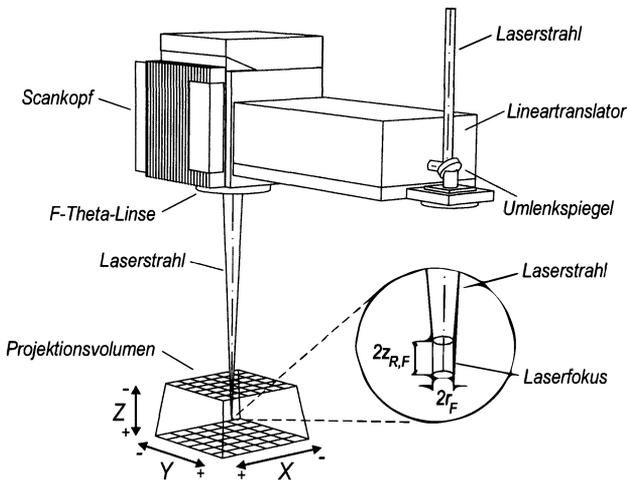


Bild 15: Geometrische Modellierung des Scansystems und des Laserstrahls

Zunächst mußten hierfür die Kollisionsobjekte geometrisch modelliert werden. In Bild 15 ist exemplarisch das Geometriemodell des Scansystems mit 3D-Fokuslagensteuerung dargestellt. Der Laserstrahl wird durch einen kegelförmigen Körper abgebildet, dessen Ausmaße u.a. von der jeweiligen Wellenlänge und den verwendeten Objektiven abhängen. Der Bereich des Laserfokus wird geometrisch durch einen zylindrischen Körper beschrieben, da in diesem Bereich der Laserstrahl als nahezu parallel betrachtet werden kann. Seine Länge entspricht der zweifachen Rayleigh-Länge $z_{R,F}$ und sein Durchmesser dem zweifachen Fokusradius r_F .

Mit diesem gewählten Ansatz ist zum einen eine Überprüfung auf eine kollisionsfreie Bearbeitung möglich, indem zwischen dem kegelförmigen Körper und dem Werkstückmodell auf eine geometrische Durchdringung beider Körper getestet wird. Zum anderen kann durch die explizite Modellierung des Laserfokusbereichs überprüft werden, ob die Bearbeitung im Fokus erfolgt. Hierfür muß eine Kollision zwischen dem zylindrischen Laserfokusobjekt und dem Werkstück erfolgen.

Für die Kollisionserkennung war insbesondere die Ausrichtung des Laserstrahls, d.h. die räumliche Orientierung des geometrischen Laserstrahlobjekts zwischen Werkstückoberfläche und Scankopf herzuleiten. Dieses Problem entspricht dem der Rückwärtstransformation, bei dem der Laserstrahl als letztes Glied einer kinematischen Kette betrachtet wird. Allerdings wurde die Berechnung hier erschwert, da die Orientierung des Laserstrahls von den verwendeten Komponenten zur Laserstrahlführung und -formung abhängt und daher eine Fallunterscheidung für die verschiedenen Scansysteme erfolgen mußte.

Die Endposition des Laserstrahlobjekts ist explizit durch die Angabe der Position des TCP auf der Bearbeitungskontur in der Projektionsebene oder im Projektionsvolumen gegeben und im Normalenkoordinatensystems des Scansystems S_0 definiert. Aus dieser Punktangabe wird nun die räumliche Orientierung des Laserstrahls berechnet. Der Orientierungsvektor r der Laserstrahlachse ist daher der normierte Abstandsvektor:

$$r = \frac{1}{|p - a|} (p - a) \quad (2)$$

mit p : Position des Endeffektors (TCP)

a : Austrittspunkt des Laserstrahls aus dem Scankopf

Für das Scansystem nach der Post-Objektiv-Anordnung mit dynamischem Fokussiermodul wird der Strahlverlauf als von dem letzten Galvospiegel aus orientiert angesehen. Diese Idealisierung kann aufgrund des großen Abstands zwischen dem Werkstück und dem Galvospiegel vorgenommen werden. Mit dem damit gegebenen Austrittspunkt a können die Orientierungswinkel β und γ ermittelt werden. Aus Bild 16 lassen sich die hierfür erforderlichen Geometriebeziehungen direkt ableiten. Der Winkel β ergibt sich damit zu

$$\beta = \arccos(r \cdot S_z) \quad (3)$$

mit r : Orientierungsvektor der Laserstrahlachse

S_z : Einheitsvektor in Richtung der z-Achse des Scannerkoordinatensystems S_0

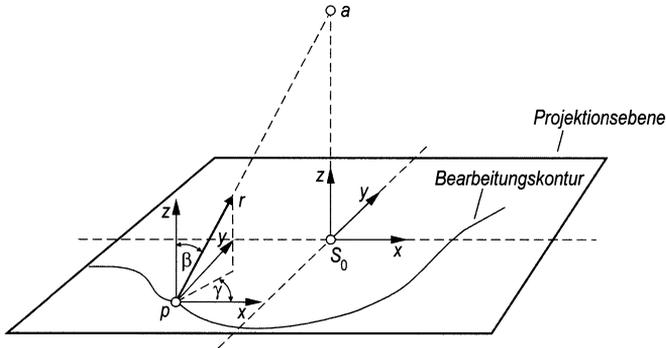


Bild 16: Laserstrahlorientierung für Scansysteme in der Post-Objektiv-Anordnung mit dynamischem Fokussiermodul

Für die Berechnung des Winkels γ wird der Orientierungsvektor r auf die xy -Ebene des Koordinatensystems S_0 projiziert. Als Winkelwert ergibt sich dann

$$\gamma = \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) \quad (4)$$

mit r_x : x-Wert des Orientierungsvektors r
 r_y : y-Wert des Orientierungsvektors r

Aufgrund der Periodizität der Funktionen existieren im Bereich $[\pm\pi, -\pi]$ zwei unterschiedliche Lösungen, so daß immer zusätzlich die z -Koordinate zu ermitteln ist. Ist der Koordinatenwert negativ, so ist zu den ermittelten Winkelwerten 180° zu addieren.

Bei der Verwendung eines Scansystems nach der Pre-Objektiv-Anordnung und auch beim Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung kann der Laserstrahl nicht mehr als vom Galvoscaner aus orientiert betrachtet werden. Durch das verwendete F-Theta-Objektiv erfolgt eine Verschiebung des Austrittspunkts, so daß die F-Theta-Bedingung aus Gl. (1) berücksichtigt werden muß (Bild 17). Die Abstände h_1 zwischen dem letztem Galvospiegel und dem Eintrittspunkt in das F-Theta-Objektiv sowie h_2 zwischen der Austrittsebene des Objektivs und der Projektionsebene sind gegeben. Damit ergibt sich der Austrittspunkt zu

$$a' = h_2 S_z + \frac{d_1 p}{|p|} \quad (5)$$

mit h_2 : Abstand zwischen Austrittsebene des Objektivs und Projektionsebene
 d_1 : Abstand zwischen Austrittspunkt und Mittelpunkt des F-Theta-Objektivs

oder aufgrund der Beziehung zwischen dem Winkel θ und dem Abstand

$$d_1 = h_1 \tan(\theta) \quad (6)$$

zu

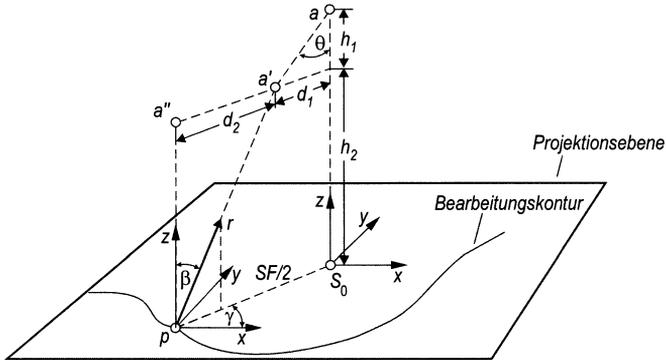


Bild 17: Laserstrahlorientierung für Scansysteme in der Pre-Objektiv-Anordnung mit telezentrischem und nicht-telezentrischem F-Theta-Objektiv

$$a' = h_2 S_z + \frac{h_1 \tan(\theta) p}{|p|}. \quad (7)$$

Für den gesuchten Winkel β gilt nun mit

$$\tan(\beta) = \frac{\frac{SF}{2} - d_1}{h_2} \quad (8)$$

und mit der F-Theta-Beziehung damit

$$\beta = \arctan\left(\frac{f\theta - h_1 \tan(\theta)}{h_2}\right). \quad (9)$$

Dabei ist der Winkel β durch die funktionale Abhängigkeit zu θ implizit gegeben. Für den Winkel γ gilt hier

$$\gamma = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right). \quad (10)$$

Für die Verwendung eines telezentrischen Objektivs erfolgt die senkrechte Ausrichtung des Laserstrahls über die gesamte Projektionsebene bzw. das Projektionsvolumen. Hieraus ergeben sich der Austrittspunkt und die Orientierungswinkel zu:

$$\begin{aligned} a'' &= p + h_2 S_z \\ \beta &= 0, \gamma = \text{undef.} \end{aligned} \quad (11)$$

Mit den entwickelten Gleichungen ist nun die Berechnung des Laserstrahlverlaufs für die verschiedenen Scansysteme möglich. Sie wurden im Rahmen der Modellbildung in das Anlagenmodell integriert und stehen für die Methoden der Bearbeitungsplanung zur Erreichbarkeits-, Einfallswinkel- und Kollisionsprüfung zur Verfügung.

5.2.4 Modellierung der Handhabungskinetik

Die Handhabungskinetik hat die Aufgabe, das auf dem Dreh-/Schwenkteller befindliche Werkstück gegenüber dem Scansystem zur Bearbeitung auszurichten und in den Bearbeitungsbereich des Scansystems zu positionieren, da nur in diesem Fall eine Bearbeitung erfolgen kann. Das Handhabungssystem dient damit lediglich der Erweiterung des Arbeitsbereichs des Scansystems und der Vermeidung von Kollisionen. In Bild 18 ist die geometrische Repräsentation der Handhabungskinetik dargestellt.

Das Handhabungssystem besteht aus einem Kreuztisch mit zwei Linearachsen und einem Dreh-/Schwenkteller mit zwei rotatorischen Achsen. Der Dreh-/Schwenkteller dient als Auflagefläche für die Werkstücke und kann mit dem Kreuztisch in xy -Richtung verfahren werden. Damit stehen für die direkte Werkstückpositionierung allerdings nur vier Achsen zur Verfügung. Eine Bewegung in z -Richtung, in die Projektionsebene oder das Projektionsvolumen des Scansystems, wird mit dem Scansystem selbst durchgeführt. Hierfür ist das Scansystem auf einer zusätzlichen Linearachse (Z -Achse) angebracht. Damit stehen zur Gesamtpositionierung insgesamt fünf Achsen zur Verfügung, drei translatorische Achsen X , Y , Z sowie zwei rotatorische Achsen B und C .

Für die Positionierung des Werkstücks in den Bearbeitungsbereich des Scansystems ist daher aus der jeweiligen Bearbeitungsposition auf dem Werkstück die korrekte Ausrichtung der Handhabungskinetik zu berechnen. Die Bearbeitungsposition auf dem Werkstück ist dabei explizit gegeben. Für die richtige Orientierung des Werkstücks gegenüber dem Bearbeitungsbereich des Scansystems ist zusätzlich der Normalenvektor der Werkstückfläche

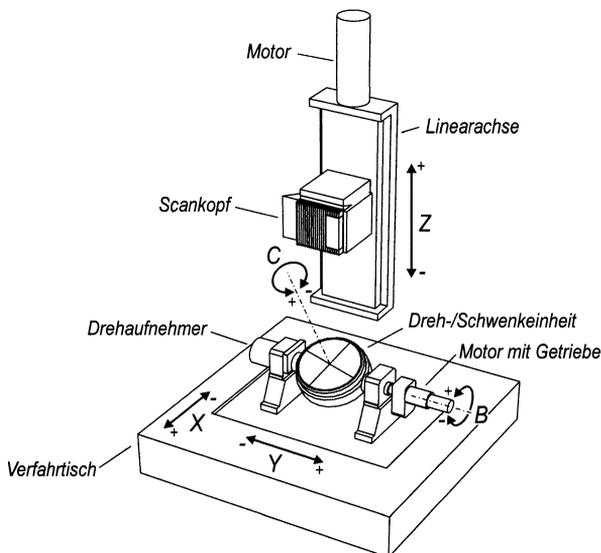


Bild 18: Geometrischer und kinematischer Aufbau der Handhabungskinetik

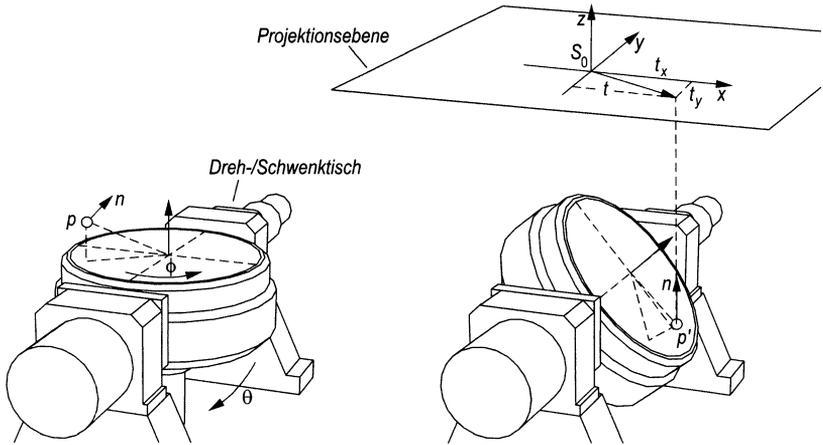


Bild 19: Rücktransformation der rotatorischen Achsen der Handhabungskinetik

in der Bearbeitungsposition notwendig. Das Problem der Rückwärtskinematik für die Handhabungskinetik lautet somit: Für einen gegebenen Punkt p mit der Flächennormalen n sind die fünf Achswerte $a = (x, y, z, \theta, \phi)^T$ der Handhabungskinetik gesucht, die diese Ausrichtung vornehmen.

Für die Transferbewegung ist eine kombinierte Dreh-/Schwenk- und Verfärbewegung notwendig. Wichtig ist hierbei, zwischen der Abfolge der jeweils zu drehenden Achsen zu unterscheiden, deren Drehsinn und dem Definitionsbereich der Orientierungswinkel. Aufgrund der kinematischen Abhängigkeiten zwischen den Dreh- und Schubachsen werden zunächst die Winkel der Rotationsachsen berechnet. Mit den ermittelten Drehwinkeln der Rotationsachsen lassen sich anschließend die notwendigen Verfärbewegungen und damit die Achswerte der einzelnen Schubachsen bestimmen. Die mathematisch äquivalente Darstellung dieser Überführung wird durch eine Transformation über die Angabe der Drehwinkel und einen Verschiebevektor beschrieben.

Die Orientierung eines Punktes p gegenüber dem Handhabungskoordinatensystem H_0 kann im allgemeinen durch drei voneinander unabhängige Drehungen um die Koordinatenachsen vorgenommen werden. Jede Teilrotation um die einzelnen Achsen des Koordinatensystems H_0 kann durch eine Teilrotationsmatrix dargestellt werden. Die Gesamtrotationsmatrix R_{ges} läßt sich durch die Multiplikation der drei Teilrotationsmatrizen

$$R_{ges} = R_x(\psi) R_y(\theta) R_z(\phi) \quad (12)$$

zusammenfassen. Die Orientierung entsteht somit durch Drehung um die C-Achse um den Winkel ϕ , anschließender Drehung um die B-Achse um den Winkel θ und abschließender Drehung um die A-Achse um den Winkel ψ . Für die Hintereinanderschaltung von Basisrotationen um die Achsen des Koordinatensystems ist die Reihenfolge der Rotationsausführungen zu beachten.

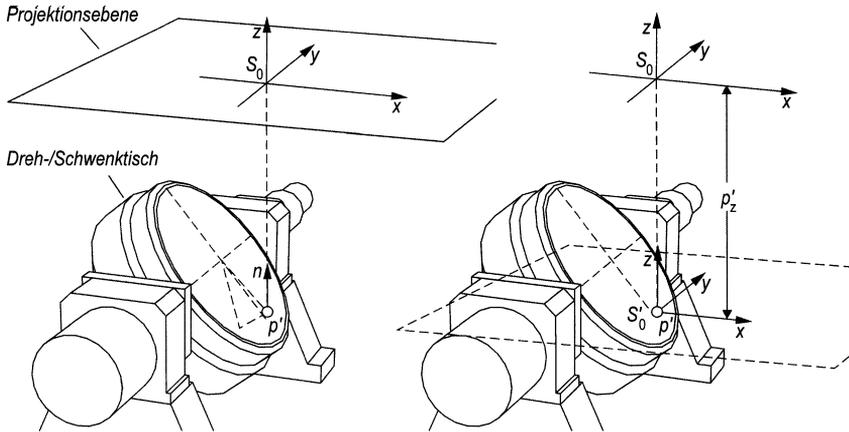


Bild 20: Rücktransformation der translatorischen Achsen der Handhabungskinematik

Da sich im Handhabungssystem die C-Achse in der kinematischen Kette nach der B-Achse befindet und keine A-Achse vorhanden ist, ergibt sich die Rotationsmatrix für das Handhabungssystem somit zu

$$R_{HHS}(0, \theta, \phi) = R_x(0) R_y(\theta) R_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi & \sin \theta \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Die jeweiligen Winkelwerte für θ und ϕ ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} \phi &= \arctan \left(\frac{n_y}{n_x} \right) \\ \theta &= -\arctan \left(\frac{n_x}{n_z} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Durch Multiplikation der Bearbeitungsposition p mit der Rotationsmatrix R_{HHS} wird die Bearbeitungsposition in die neue Position p' , mit einem zur Bearbeitungsebene des Scansystems senkrecht ausgerichteten Normalenvektor, überführt (Bild 19, links):

$$p' = -p R_{HHS}. \quad (15)$$

Für die Berechnung des Verschiebevektors erfolgt die Projektion des Punktes p' in das Normalenkoordinatensystems des Scansystems S_0 . Aus dem hierdurch entstehenden Vektor t können die Werte für die X- und Y-Achse direkt bestimmt werden (Bild 19, rechts) und ergeben sich zu t_x und t_y . Damit fällt der Normalenvektor des Punktes p' mit der Z-Achse des Scannerkoordinatensystems S_0 zusammen (Bild 20, links).

Für die Bearbeitung ist es allerdings noch notwendig, den Bearbeitungsbereich des Scansystems in den Punkt p' mit der Z-Achse zu verfahren (Bild 20, rechts). Der Wert hierfür

entspricht dem z-Abstand zwischen dem Punkt p' und S_0 . Insgesamt ergibt sich damit der Verschiebevektor zu

$$v = (-t_x, -t_y, -p'_z)^T. \quad (16)$$

Zur Integration des Verschiebevektors wird die Rotationsmatrix um eine vierte Zeile und Spalte für die Aufnahme des translatorischen Teils erweitert. Der Vorteil dieser Darstellung ist die Kombinationsmöglichkeit von mehreren Transformationen in einer Matrix.

$$M_{ges} = T_{XYZ}(-t_x, -t_y, -p'_z) R_{HHS} = \begin{bmatrix} & & & -t_x \\ & R_{HHS} & & -t_y \\ & & & -p'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Mit der Gesamttransformationsmatrix sind jetzt auch einfache Transformationen von einem Koordinatensystem in ein anderes möglich und beschränken sich auf Matrizeninvertierung und -multiplikation.

Bei der Berechnung der Achswerte für die Handhabungskinetik treten Entscheidungsprobleme auf, die nicht allein mit den Gleichungen gelöst werden können. Bei der Berechnung der Dreh- und Schwenkwerte sind die Orientierungswinkel θ und ϕ jeweils im gesamten Intervall $[-\pi, +\pi]$ definiert, so daß die senkrechte Ausrichtung des Normalenvektors von p' mit zwei unterschiedlichen Handhabungshaltungen erreicht werden kann. Es muß daher entschieden werden, welche der beiden mathematisch korrekten Lösungen der Rücktransformation auszuwählen ist.

Bei der Auswahl einer Handhabungshaltung aus mehreren Lösungen der Rücktransformationen werden häufig Vorzugsregeln angewendet, wie etwa

- die kleinste Summe der Drehwinkeländerungen,
- die kleinste maximale Drehbewegung,
- die kürzeste Verfahrszeit oder auch
- der kleinste Drehwinkel einer bestimmten Achse.

Im realisierten Anlagenmodell wurde die Orientierungsänderung des Handhabungssystems entlang der kürzeren Winkeldifferenz von $\Delta\phi$ gewählt. Damit ist die Orientierungsänderung von θ implizit gegeben.

5.3 Bearbeitungsmodellierung

Im Bearbeitungsmodell sind alle Informationen zu speichern, die für die Planung der Bearbeitung sowie für die abschließende Programmerstellung benötigt werden. Hierzu gehören in erster Linie die Verfahrenswege des Laserstrahls sowie Informationen zur technologischen Beschreibung des Bearbeitungsvorgangs, die während der Bearbeitungsplanung und der Programmgenerierung zu berücksichtigen sind. Im folgenden wird der Aufbau des entwickelten Bearbeitungsmodells dargestellt.

5.3.1 Aufbau des Bearbeitungsmodells

Als Grundlage für das realisierte Bearbeitungsmodell dient zunächst primär das Werkstückmodell. Die Ermittlung der Verfahrenswege erfolgt durch die automatische Analyse des Werkstückmodells, bei der aus dem geometrischen Verlauf der Bearbeitungskonturen unter Berücksichtigung von Bearbeitungsstrategien die Laserbahnen (oder TCP-Bahnen) bestimmt und die einzelnen Fertigungsschritte abgeleitet werden.

Die Ablage der Bearbeitungsbahnen erfolgt in einer dreistufigen Hierarchie. Die oberste Hierarchiestufe faßt alle Laserbahnen in einer Aggregationsstruktur zusammen. Hier sind nicht nur die Laserbahnen, die aus den Bearbeitungskonturen des Werkstückmodells erzeugt worden sind, zusammengefaßt, sondern es werden in dieser Datenstruktur auch die notwendigen Transferbewegungen zwischen den Laserbahnen gehalten. Die Laserbahnen selbst bestehen wiederum aus einer Menge von Bahnstützpunkten.

Die Beschreibung der Bahninformationen erfolgt im Werkstückkoordinatensystem. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die im Bearbeitungsmodell enthaltenen Informationen steuerungsunabhängig zu gestalten. Voraussetzung seitens der Bearbeitungsplanung hierfür ist jedoch das Vorhandensein einer kinematischen Rücktransformation. Insofern wurden die von der Bearbeitungsplanung erzeugten Bewegungsvorgaben nicht in Form eines NC-Programms abgelegt, sondern als steuerungstechnisch neutral angelegte Bahnpunkte. Die darin enthaltenen Informationen können abschließend genutzt werden, um ein steuerungsabhängiges NC-Programm zu erstellen, das von der Steuerung der Laseranlage interpretiert und abgearbeitet werden kann.

5.3.2 Modellierung der Laserbearbeitungsbahnen

Bei der Umsetzung der Bearbeitungskonturen des Werkstückmodells in das Bearbeitungsmodell wird für jede Bearbeitungskontur eine Laserbahn erzeugt. Die Geometrie der Bearbeitungskontur wird dabei durch eine Folge von untereinander verbundenen Bahnstützpunkten im Bearbeitungsmodell abgebildet. Die Art und Weise, in der die geometrische Abbildung der Bearbeitungskontur durch Bahnstützpunkte vorgenommen wird, ist von der verwendeten Interpolationsart abhängig. Allerdings ist der Verlauf der Laserbahn nicht unbedingt mit dem Verlauf der Bearbeitungskontur identisch, sondern kann bei einigen

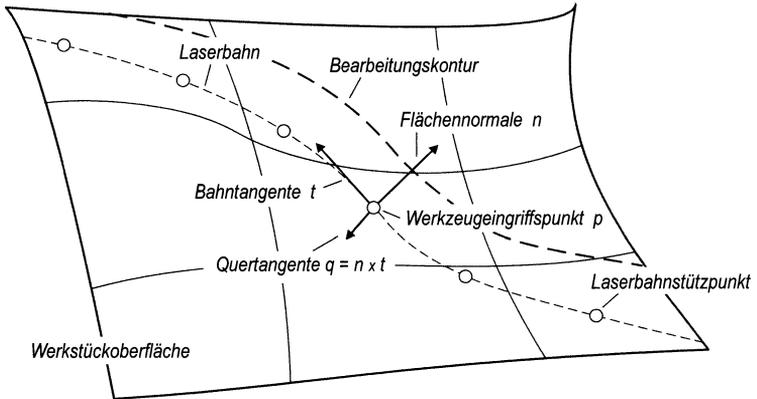


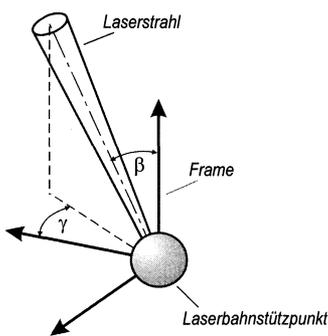
Bild 21: Ableitung der Laserbahnstützpunkte aus den Bearbeitungskonturen des Werkstückmodells

Bearbeitungsverfahren um den Laserfokusradius in lateraler Richtung verschoben sein (Bild 21).

Im Bearbeitungsmodell wurde daher bei der Generierung der Laserbahn auch eine 3D-Werkzeughahnkorrektur implementiert. Die 3D-Werkzeughahnkorrektur hat die Aufgabe, unter Berücksichtigung der Laserfokuseometrie, der Flächen- bzw. Kurvennormale sowie der Bearbeitungsparameter den Verlauf der Laserbahn relativ zur Bearbeitungskontur zu ermitteln. Die hierfür benötigte Analyse der Werkstücksteigung und -krümmung, in jede beliebige Richtung auf der Werkstückoberfläche, bieten CAD-Systeme als Standardfunktionen an. Da die Problematik der 3D-Werkzeughahnkorrektur auch für verschiedene Interpolationsarten bereits häufig darstellt wurde, wird auf die umfangreiche Literatur verwiesen [42,62,65,78,79].

Eine Änderung durch den Benutzer, beispielsweise durch das Modifizieren von Bearbeitungskonturen im Werkstückmodell würde jedoch eine vollständige Neugenerierung aller Laserbahnen erforderlich machen. Aus diesem Grund besteht zwischen den Laserbahnen und ihren entsprechenden Bearbeitungskonturen im Werkstückmodell eine datentechnische Verbindung, so daß in diesem Fall nur die durch die Änderung betroffenen Verfahrense neu berechnet werden müssen.

Die in der 3D-Werkzeughahnkorrektur ermittelten geometrischen Informationen werden in den geometrisch-technologischen Prozeßvektoren, den Laserbahnstützpunkten, zusammengefaßt. Ein Bahnstützpunkt dient als eine steuerungsunabhängige Informationseinheit zur Ablage des Werkzeugeingriffspunkts (Fokus), der Achsstellung, dem Einfallwinkel des Laserstrahls relativ zur Werkstückoberfläche, der technologischen Parameter sowie der Interpolationsart. Die Bestimmung des Einfallwinkels des Laserstrahls zur Werkstückoberfläche wird mit Hilfe der Orientierung eines Koordinatensystems im



Dateninformationen
• Räumliche Position im Werkstückkoordinatensystem
• Einfallswinkel zwischen Laserstrahl und Werkstückoberfläche
• Technologische Parameter
• Achsstellung
• Interpolationsart

Bild 22: Dateninformationen eines Laserbahnstützpunkts

Laserbahnstützpunkt vorgenommen und dazu ein lokales Koordinatensystem (*frame*) im Werkzeugeingriffspunkt definiert (Bild 22).

Ein *Frame* ist ein kartesisches Rechtskoordinatensystem, dessen Koordinatenrichtung im Laserbahnstützpunkt definiert ist durch die Flächennormale n , die Bahntangente t in Bearbeitungsrichtung und der Quertangente q . Die Flächennormale, die senkrecht zur Fläche steht, weist vom Material des Körpers weg, so daß damit implizit die Materialsituation festgelegt und auswertbar ist. Die Bahntangente t ist als der Winkel zwischen dem Normalenvektor n der Werkstückoberfläche und der Laserbahn in Bearbeitungsrichtung definiert. Die Quertangente q ergibt sich aus dem Kreuzprodukt von t und n und bildet damit das Rechtssystem $[t, q, n]$.

Die Einfallswinkel des Laserstrahls β und γ legen die Orientierung des Laserstrahls in diesem lokalen Koordinatensystem fest. Alle ermittelten Werte, geometrischen Informationen sowie die Eingriffsverhältnisse werden anschließend zusammen mit den technologischen Informationen im Bahnstützpunkt gespeichert.

5.3.3 Technologieanbindung

Eine grundlegende Voraussetzung für die rechnergestützte Anlagenprogrammierung und Anwenderprogrammerstellung ist die Einbeziehung technologischer Beschreibungsmöglichkeiten. Insofern umfaßt der Begriff der Laserbahn auch alle damit verknüpften Prozeßparameter sowie prozeß- und vorgangsbeschreibende Informationen. Die Prozeßparameter sowie prozeß- und vorgangsbeschreibende Informationen sind nicht in den Bahnelementen selbst enthalten, sondern über Attribute mit den einzelnen Bahnelementen datentechnisch lose gekoppelt. Damit ergibt sich insgesamt für das Bearbeitungsmodell ein Aufbau, wie er in Bild 23 dargestellt ist.

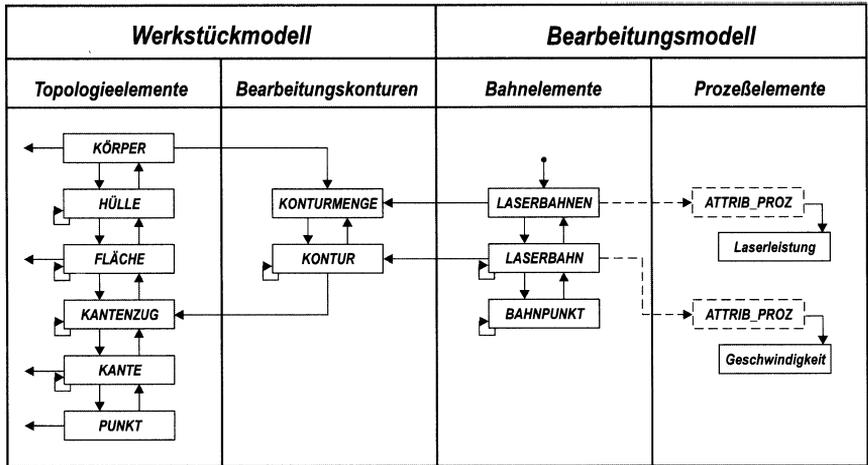


Bild 23: Aufbau und Kopplung des Bearbeitungsmodells mit dem Werkstückmodell

Für jeden Prozeßparameter, d.h. für jede prozeß- und vorgangsbeschreibende Information wurde ein eigener Prozebelementtyp implementiert, wie beispielsweise für die Laserleistung oder die Bearbeitungsgeschwindigkeit. Falls der gleiche Prozebelementtyp mit Elementen unterschiedlicher Hierarchiestufe verknüpft ist, wird das Prozebelement – etwa eine Geschwindigkeitsangabe – bei einer Laserbahn höher bewertet, als eine Geschwindigkeitsangabe, die global allen Laserbahnen zugeordnet ist.

6 Methoden der Bearbeitungsplanung

6.1 Analyse der Bearbeitungsaufgabe

Prinzipiell können die Laserbahnen aus den Bearbeitungskonturen des Werkstückmodells unter Berücksichtigung der 3D-Werkzeugkorrektur abgeleitet, dann die Anlagenbewegungen für die einzelnen Laserbahnen separat geplant und abschließend die günstigsten Transferbewegungen zwischen den Bahnen bestimmt werden. Im Hinblick auf das betrachtete Anlagenspektrum würde diese Vorgehensweise allerdings die Potentiale der redundanten und multiplen Kinematik nicht nutzen und gegenüber einer einzelnen Handhabungskinematik kaum einen Bearbeitungsvorteil versprechen, da die Vorteile der scannenden Bearbeitung verloren gehen.

Charakteristisch für die Bearbeitungsaufgabe ist, daß die Bearbeitungskonturen in der Regel über das gesamte Werkstück verteilt sind und das Scansystem die Bearbeitung des Werkstücks nur insoweit vornehmen kann, wie sich Bearbeitungskonturen im Bearbeitungsbereich des Scansystems befinden. Für diese Bearbeitungskonturen muß zudem eine hinreichend senkrechte Ausrichtung des Laserstrahls auf die Werkstückoberfläche und eine kollisionsfreie Bearbeitung sichergestellt sein. Ansonsten besteht aufgrund der geringen kinematischen Flexibilität des Scansystems ausschließlich die Möglichkeit, die Bearbeitung von einer anderen Scansystemposition aus fortzuführen. Um eine möglichst geringe Bearbeitungszeit zu erreichen, sind die Vorzugslagen daher so zu wählen, daß möglichst viele bearbeitbare Laserbahnen auf einmal im Bearbeitungsbereich des Scansystems liegen. Insofern müssen daher – ausgehend von den durch die Fertigungsaufgabe definierten Laserbahnen und unter Berücksichtigung des Bewegungsvermögens der beteiligten Kinematiken – global günstige Bearbeitungs- bzw. Vorzugslagen berechnet werden, damit die durch den Einsatz von Handhabungskinematik und Scansystem erreichbare Steigerung der Bearbeitungsgeschwindigkeit zur Erstellung effizienter Anwenderprogramme genutzt werden kann. Dieser Aufgabe kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie einen wesentlichen Einfluß auf die Bearbeitung hat und über die Qualität und Wirtschaftlichkeit des Fertigungsvorgangs mitentscheidet.

Die Bearbeitungsplanung hat demnach die Aufgabe, nicht nur die Bearbeitung einzelner Bahnen zu planen, sondern die gesamte Bearbeitung des Werkstücks zu optimieren, indem bestmögliche und aus wirtschaftlicher Sicht möglichst wenige Vorzugslagen berechnet werden. Dies setzt leistungsfähige und im Hinblick auf die verschiedenen Anlagenkonfigurationen möglichst allgemeingültige Methoden zur Bearbeitungsplanung voraus. Allerdings wird diese Aufgabenstellung nicht zuletzt durch die komplexe kinematische Struktur von Scansystem und Handhabungskinematik weiter erschwert.

Für die Kinematikkombination, die sich aus den mechanischen Achsen des Handhabungssystems sowie den „optischen“ Achsen des Scansystems ergibt, ist somit das Problem der allgemeinen inversen Kinematiktransformation zu lösen, welche als Grundlage der Bearbeitungsplanung dient. Insgesamt haben die Methoden der Bearbeitungsplanung damit die Aufgabe, die Redundanzen der Anlagenkinematik gezielt für die Ermittlung erreichbarer und kollisionsfreier Vorzugslagen ausnutzen sowie die inverse Kinematik unter Erfüllung frei konditionierbarer Gütekriterien zu ermitteln und damit das Redundanzproblem bei der Wahl der Achsen zu lösen.

Darüber hinaus müssen die Methoden der Bearbeitungsplanung die technologischen Randbedingungen berücksichtigen, da sie den Planungsvorgang beeinflussen können. Die Überwachung dieser Randbedingungen ist ein weiterer Aspekt bei der Bearbeitungsplanung. Weiterhin ist im Hinblick auf eine hohe Benutzerakzeptanz auch die Einhaltung kurzer Antwortzeiten bei den erforderlichen Berechnungen von Bedeutung.

6.2 Optimierungsverfahren und Komplexitätsbetrachtungen

Das bestehende Problem, aus einer gegebenen Menge von Laserbahnen eine möglichst geringe Anzahl günstiger Bearbeitungs- bzw. Vorzugslagen zu berechnen, stellt ein Optimierungsproblem dar. Optimal bedeutet hierbei, die bestmögliche Lösung im Sinne vorgegebener Kriterien unter Berücksichtigung technologischer und anlagentechnischer Randbedingungen zu finden. Zur Lösung von Optimierungsproblemen stehen eine Reihe von Verfahren zur Verfügung, die sich hinsichtlich ihres Anwendungsbereichs, ihrer Konvergenzeigenschaften sowie ihrer Rechengeschwindigkeit voneinander unterscheiden. Die Optimierungsmethoden können dabei grob in drei Klassen eingeteilt werden, die entweder sämtliche Lösungen aufzählen, Lösungen analytisch berechnen oder stochastisch Lösungen aus dem Lösungsraum auswählen (Bild 24).

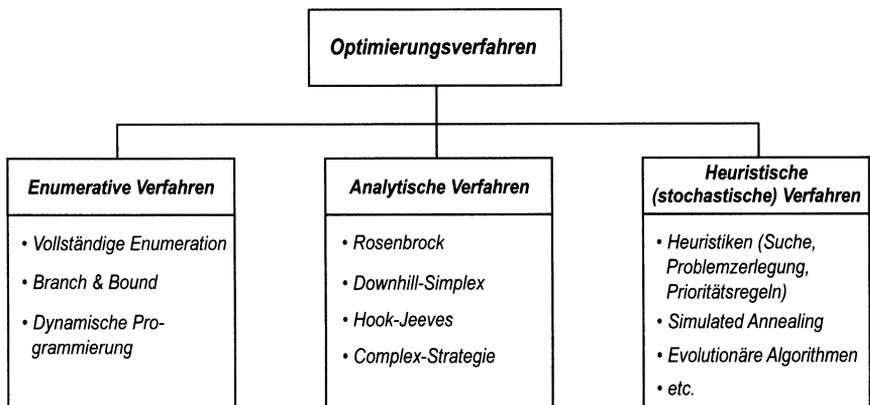


Bild 24: Einteilung der Optimierungsverfahren

n	$O(n^2)$	$O(2^n)$	$O(n!)$
1	1	2	1
2	4	4	2
3	9	8	6
4	16	16	24
5	25	32	120
6	36	64	720
7	49	128	5040
8	64	256	40320
9	81	512	362880
10	100	1024	3628800

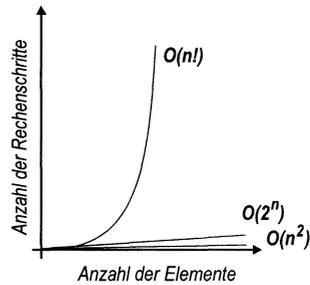


Bild 25: Komplexitätsbetrachtungen von Optimierungsproblemen

Das Maß für die Komplexität eines Optimierungsproblems wird mit der Schreibweise $O(x)$ angegeben, wobei die „ O “-Notation eine Größenordnung beschreibt, welche die maximale Ausführungszeit, d.h. eine obere Grenze für das Rechenzeitverhalten, angibt [80]. In Bild 25 ist das Rechenzeitverhalten von quadratisch, exponentiell und mit der Fakultät mit der Anzahl der Elemente wachsenden Optimierungsproblemen angegeben.

Hinsichtlich des Berechnungsaufwands eines Optimierungsproblems wird zwischen zwei verschiedenen Problemklassen unterschieden, Probleme mit einer polynomialen Laufzeit (P) und einer exponentiellen oder mit der Fakultät ansteigenden Laufzeit (NP-Problem) des Algorithmus. Nach dieser Klassifizierung werden P -Probleme als leicht und NP-Probleme als schwer lösbar bezeichnet. Eines der bekanntesten NP-Probleme ist das TSP-Problem (*traveling salesman*) [81]. Die Optimierungsaufgabe besteht hier darin, aus einer gegebenen Menge von Städten die kürzeste Reiseroute zu berechnen.

Zur Lösung eines Optimierungsproblems werden bei den Verfahren der Vollständigen Enumeration alle Lösungen nacheinander erzeugt und bewertet [82]. Hierdurch wird sichergestellt, daß die beste Lösung (globales Optimum) des Problems gefunden wird. Da aber die Anzahl aller möglichen Kombinationen schon bei kleineren Problemen sehr hoch werden kann, ist dieses Verfahren nur in kleinen Lösungsräumen anwendbar. Aufgrund dieser Limitierung wurden modifizierte enumerierende Optimierungsverfahren entwickelt, bei denen durch die Integration von Problemwissen so wenig Lösungen wie möglich berechnet werden müssen, aber dennoch das Auffinden der besten Lösung garantiert bleibt.

Der wohl bekannteste Vertreter dieser Optimierungsverfahren ist das Branch and Bound-Verfahren [83]. Ausgehend von einem Suchbaum wird bei diesem Verfahren das Gesamtproblem rekursiv in kleinere, disjunkte Teilprobleme zergliedert (*branching*) und die Kostenuntergrenze für jedes Teilproblem berechnet. Um nicht den gesamten Lösungsraum absuchen zu müssen, werden nur die Teilprobleme weiter zergliedert, die bisher noch nicht untersucht worden sind oder in denen eine optimale Lösung zu erwarten ist. Die Entscheidung, ob ein Zweig weiter untersucht werden muß, geschieht durch den Vergleich einer unteren Schranke für den Zielfunktionswert mit der bis dahin besten gefundenen Lösung

(*bounding*). Das Verfahren terminiert, wenn alle Zweige abgesucht worden sind. Im ungünstigsten Fall kann dieses Verfahren allerdings auch zu einer vollständigen Enumeration des Lösungsraums führen.

Bei den analytischen Strategien zur Lösung eines Optimierungsproblems werden im Lösungsraum Minima gesucht. So folgt etwa die Methode des Gradientenabstiegs bei der Berechnung einer Lösung stets dem größten Abfall einer Funktion. Allerdings bergen solche Strategien die Gefahr, auf ein lokales Minimum zu laufen und darin zu verbleiben. Diese Gefahr ist um so größer, je diskontinuierlicher der Lösungsraum ist. Liegen viele lokale Minima im Lösungsraum weit verstreut, so werden in Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen unterschiedliche Lösungen gefunden. Derartige Strategien sind insofern nicht robust. Zudem lassen sich die Zielfunktionen und die Randbedingungen des Optimierungsproblems meist nur für vereinfachte Problemstellungen formulieren, so daß dies, aufgrund der hohen Irregularitäten (Nicht-Differenzierbarkeit, Nicht-Konvexität, Multimodalität usw.), bei komplexeren Problemen oft nicht möglich ist.

Optimierungsprobleme entziehen sich oft einer exakten Lösung, da es aufgrund des notwendigen Berechnungsaufwands nicht möglich ist, den gesamten Lösungsraum abzusuchen. Die Suche nach der exakten Lösung muß daher beschleunigt werden, um in einem vertretbaren Zeitraum im exponentiell großem Lösungsraum eine Lösung zu finden. Optimierungsverfahren, die nicht den gesamten Lösungsraum absuchen sind heuristische Algorithmen. Sie erzielen zwar nur eine näherungsweise Lösung, aber der erforderliche Berechnungsaufwand wird erheblich reduziert. Viele Optimierungsaufgaben sind überhaupt erst dadurch lösbar.

Heuristische Verfahren versuchen im festgelegten, exponentiell großen Lösungsraum durch plausible Grundregeln, problemspezifische Informationen und Wissen, die in die Suche mit eingehen, eine optimale Lösung für die aktuelle Problemstellung zu finden. Der große Vorteil heuristischer Algorithmen liegt in ihrer geringen Rechenzeit. Die heuristischen Verfahren bestehen meist aus zwei Teilen, einer Initialisierungsphase, die eine Anfangslösung liefert und einer iterativ durchgeführten Berechnungsphase, die eine gefundene Lösung versucht sukzessive zu verbessern. Bekannte Algorithmen zur Generierung einer Anfangslösung sind Nearest Neighbour [84], Cheapest Insertion [85] oder Minimum Spanning Tree [86]. Zu den lösungsverbessernden Iterationsverfahren zählen beispielsweise das Simulated Annealing [87,88] oder die Evolutionären Algorithmen [89].

Beim Simulated Annealing wird der Optimierungsvorgang dem physikalischen Abkühlverhalten einer Schmelze nachgebildet. Beim Abkühlen einer Schmelze verlieren die Moleküle ihre thermische Mobilität und richten sich oft über viele Moleküle hinweg geordnet aus, so daß sie einen Kristall bilden, der energetisch günstiger ist als eine amorphe Struktur und dies umso mehr, je langsamer die Schmelze abgekühlt wurde. Dieses Verhalten versucht der Optimierungsalgorithmus nachzubilden: Im thermischen Gleichgewicht ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Energiezustands E mit

$$P(E) \sim e^{-\frac{E}{kT}} \quad (18)$$

und der Boltzmann-Konstante k gegeben. Das System kann also in einen Zustand höherer oder niedrigerer Energie übergehen, allerdings ist ein Temperaturanstieg unwahrscheinlicher je niedriger die Temperatur T ist. Der Algorithmus simuliert nun dieses Verhalten, indem er zufällige Änderungen an der bisherigen Lösung durchführt, wobei eine Lösungsverbesserung (Energieerniedrigung) immer und eine Verschlechterung der Lösung (Energieerhöhung) mit der Wahrscheinlichkeit $P(E)$ vorgenommen wird, was dem Metropolis-Algorithmus entspricht [90].

Zu den Vertretern der Klasse der Evolutionären Algorithmen gehören die Verfahren Genetische Algorithmen [91], Evolutionsstrategien [92] und Genetische Programmierung [93]. Sie lösen Optimierungsaufgaben, indem sie zur Suche nach Lösungen probabilistische Mittel einsetzen, bei denen der biologische Prozeß der Evolution als Vorlage dient. Analog dazu wird eine Menge von Individuen (Population) einer zufällig verteilten Mutation (Rekombinationsverfahren) ausgesetzt und in einem Selektionsschritt anschließend die „Fitneß“ eines jeden Individuums bewertet. Die Fitneß eines Individuums bestimmt die Chance auf Reproduktion und damit auf die Übernahme in die nächste Generation. Nach mehreren Iterationsschritten werden als Lösung des Optimierungsproblems aus den Individuen die am besten angepaßten, d.h. die mit den höchsten Fitneßwerten gewählt. Für die Algorithmen ist daher eine geeignete Abbildung der Problemstellung auf die Individuen und die Existenz einer Bewertungsfunktion erforderlich. Im Vergleich zu den herkömmlichen Optimierungsalgorithmen liegt hier das Wissen über die Problemlösung fast ausschließlich in den Bewertungsfunktionen.

6.3 Entwicklung einer hierarchischen Lösung

Die Anforderungen, die an den Optimierungsalgorithmus der Bearbeitungsplanung gestellt werden, sind vielfältig. Er muß der optimalen Bearbeitungsstrategie möglichst nahe kommen, eine sinnvolle Lösung finden, für verschiedene kinematische Kombinationen aus Handhabungskinematik und Scansystem anwendbar sein sowie die folgenden Rand- und Nebenbedingungen berücksichtigen:

- Es ist eine vollständige, kollisionsfreie Bearbeitung des Werkstücks zu ermöglichen.
- Die kinematischen Limitierungen der Anlagenkinematik dürfen nicht überschritten werden.
- Eine hinreichend senkrechte Ausrichtung des Laserstrahls auf die Werkstückoberfläche ist sicherzustellen.
- Die Laufzeit der Bearbeitungsplanung muß innerhalb eines für den Benutzer akzeptablen Zeitintervalls erfolgen.
- Es sind stets die technologischen Randbedingungen zu prüfen und zuberücksichtigen.

Die vorliegende Problemstellung zählt im einfachsten Fall, d. h. alle Laserbahnen sind aus einer einzigen Vorzugslage heraus kollisionsfrei bearbeitbar und es müssen keine weiteren

Randbedingungen eingehalten werden, damit bereits – aufgrund der Äquivalenz zum TSP-Problem – zur Klasse der NP-vollständigen Probleme, bei denen der Rechenaufwand zum Auffinden einer optimalen Lösung mit der Fakultät der Anzahl der Laserbahnen wächst. Aufgrund der Größe des Lösungsraums ist daher bereits ab einer geringen Anzahl an Laserbahnen eine exakte Lösung nicht mehr möglich.

In [94] wird die Vorzugslage eines stationären Werkstücks gegenüber einem Roboter berechnet, so daß alle Laserbahnen möglichst günstig erreichbar sind. Aufgrund der Komplexität des Problems werden hier zur Berechnung der Lösung evolutionäre Algorithmen eingesetzt. Für die Problemfindung ist es günstig, daß in diesem Fall nur eine einzige Vorzugslage gesucht wird. Da im vorliegenden Fall die Bearbeitung durch das Scansystem erfolgt, ist in der Regel nicht nur eine, sondern eine Mehrzahl an Vorzugslagen zu bestimmen. Es existieren damit zusätzliche Freiheitsgrade, die den Lösungsraum noch weiter aufspannen und die Härte dieses Problems aufzeigen:

- Es ist a priori nicht bekannt, wie viele Vorzugslagen zur vollständigen Bearbeitung des Werkstücks im minimalen Fall benötigt werden.
- Vorzugslagen überschneiden sich gegenseitig, indem etwa eine Laserbahn von zwei oder mehreren berechneten Vorzugslagen aus bearbeitet werden kann.
- Ein weiterer Freiheitsgrad besteht darin, daß die Bearbeitung einer Laserbahn unterbrochen und etwa von einer anderen Vorzugslage aus weitergeführt werden darf.

Bei der Lösung derartiger komplexer Problemstellungen stellt sich die Frage nach dem einzusetzenden Optimierungsverfahren. Hierbei stehen eine große Anzahl von Verfahren zur Auswahl (siehe Abschnitt 6.2), wobei die Auswahl des anzuwendenden Optimierungsverfahrens schwierig und nicht unbedingt eindeutig ist. Ein Ansatz für die Lösungen derartiger komplexer Problemstellungen besteht in der gleichzeitigen bzw. gekoppelten Anwendung verschiedener Optimierungsverfahren.

Die Optimierungsaufgabe wird daher durch eine aufeinander aufbauende Hierarchie von Optimierungsverfahren angegangen und in mehreren Stufen durchgeführt. Der Vorteil einer hierarchischen Lösung besteht darin, daß die Gesamtkomplexität des Optimierungsproblems reduziert wird und für jede Planungsstufe das günstigste Optimierungsverfahren individuell gewählt werden kann. Dabei muß aber die Voraussetzung gelten, daß sich das Optimierungsproblem in Teilprobleme aufspalten läßt, wobei die Zerlegung im Hinblick auf die Unabhängigkeit der Teillösungen geschehen muß, damit sich die Lösungen der Teilproblematiken in eine Gesamtlösung überführen lassen. Grundüberlegung ist die strikte Trennung zwischen der Orientierung des Werkstücks und der Bearbeitungsplanung der einzelnen Laserbahnen.

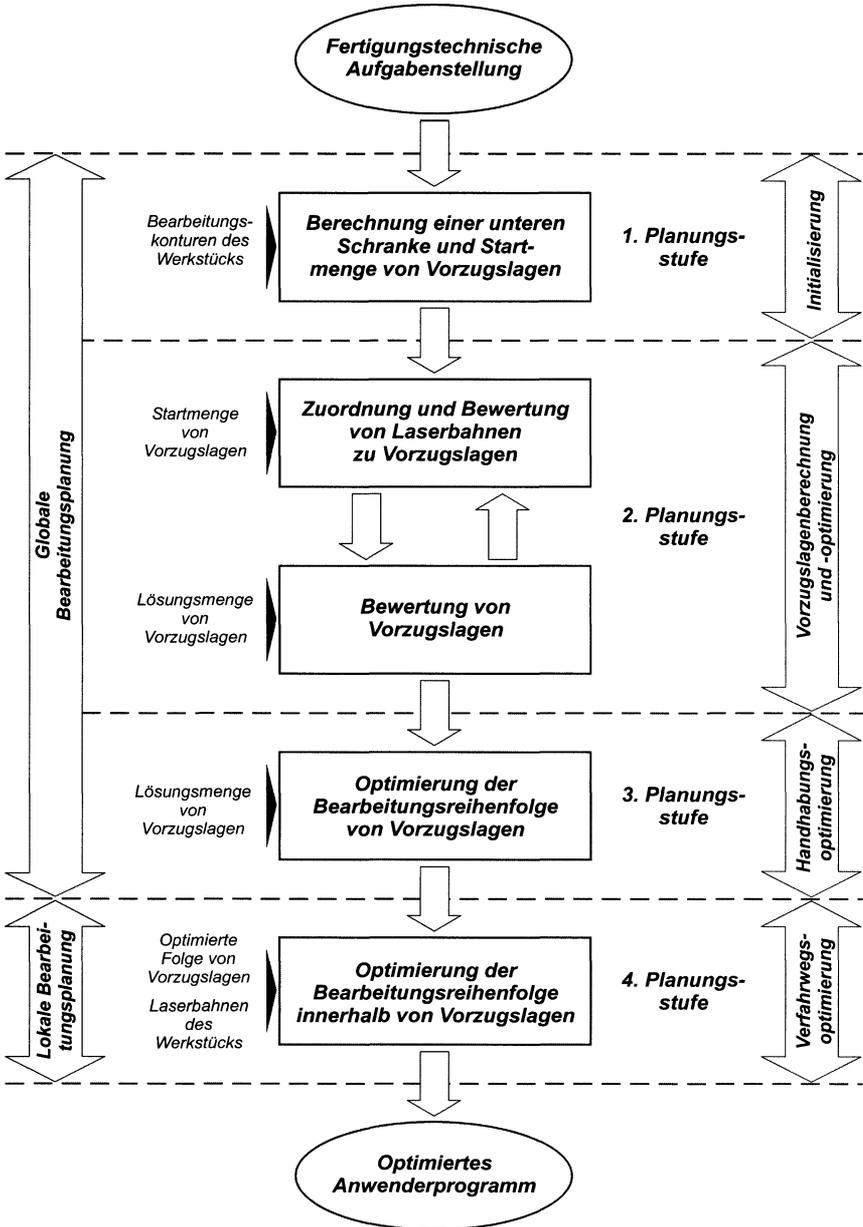


Bild 26: Aufbau der Optimierungshierarchie

Die Optimierungshierarchie ist in Bild 26 dargestellt und besteht aus vier Stufen, die sequentiell durchlaufen werden, wobei jede Schicht auf den Optimierungsergebnissen der vorhergehenden Schicht aufbaut. Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Optimierungsschichten erfolgt, indem jede Planungsstufe schichtspezifische Informationen in den Datenmodellen ablegt, die von der nächsten Planungsstufe interpretiert und spätestens nach Beendigung dieser Stufe wieder entfernt werden. Dieses Prinzip der losen Kopplung zwischen den Schichten soll die Vorteile des hierarchischen Aufbaus unterstützen und den Austausch oder das Einfügen neuer Stufen erleichtern.

Die ersten drei Schichten sind der sogenannten globalen Bearbeitungsplanung zugeordnet, die letzte Schicht der lokalen Bearbeitungsplanung. Die Aufgabe der globalen Bearbeitungsplanung ist die Berechnung von optimalen Vorzugslagen, während die lokale Bearbeitungsplanung die Optimierung der Bearbeitung innerhalb der Vorzugslagen vornimmt. Die erste Stufe der Hierarchie beginnt mit der Generierung der Laserbahnen. Hierzu werden die Laserbahnen aus den Bearbeitungskonturen des Werkstückmodells unter Berücksichtigung der 3D-Werkzeugbahnkorrektur berechnet. Anschließend wird anhand der berechneten Laserbahnen eine Startmenge von Vorzugslagen berechnet sowie eine untere und obere Schranke für die Anzahl der Vorzugslagen bestimmt.

Das Ziel der zweiten Planungsstufe ist die Anzahl der Vorzugslagen zu reduzieren. Dies wird realisiert, indem iterativ vorhandene Vorzugslagen bewertet und wenn möglich zusammengefaßt werden, indem alle Laserbahnen einer Vorzugslage auf bereits vorhandene Vorzugslagen verteilt werden. Neue Vorzugslagen müssen generiert werden, wenn eine kollisionsfreie Bearbeitung von Laserbahnen mit den vorhandenen Vorzugslagen nicht möglich ist. Am Ende der globalen Bearbeitungsplanung berechnet die dritte Planungsstufe den minimalen Verfahrenweg zwischen den berechneten Vorzugslagen. Damit werden die Bewegungen der Handhabungskinematik optimiert.

Die lokale Bearbeitungsplanung findet als letzter Schritt innerhalb der Planungshierarchie statt. Hier wird eine Optimierung der Bearbeitungsreihenfolge zwischen den Laserbahnen innerhalb der Vorzugslagen vorgenommen. Nachdem die Bearbeitungsreihenfolge der Laserbahnen bestimmt worden ist, werden die Laserbahnen einzeln geplant, die Transferbewegungen zwischen den Laserbahnen generiert und die Achsstellungen der Kinematiken zusammen mit den technologischen Parametern im Bearbeitungsmodell abgelegt. Die so berechneten Informationen stehen dann zur Simulation des Bearbeitungsvorgangs oder zur Erstellung eines steuerungsabhängigen Anwenderprogramms zur Verfügung.

6.4 Generierung einer Anfangsmenge von Vorzugslagen

Eine Berechnung der Vorzugslagen kann erfolgen, indem mehrere verschiedene räumliche Orientierungen des Werkstücks gesucht und anschließend hinsichtlich Abdeckungsgrad von Laserbahnen und Kollisionsfreiheit qualitativ bewertet werden. Weil aber die Wahl von Vorzugslagen beliebig im Raum erfolgen kann und die Lage und Orientierung der Laserbahnen in diesem Fall nicht berücksichtigt wurde, ist dieser Ansatz nicht praktikabel. Die Berechnung der Vorzugslagen muß insofern von den Laserbahnen ausgehend erfolgen. Vor dem Start der Bearbeitungsoptimierung werden deshalb zunächst aus den Bearbeitungskonturen des Werkstückmodells die Laserbahnen unter Berücksichtigung der 3D-Werkzeugbahnkorrektur berechnet.

Vorzugslagen können prinzipiell als Orientierung des Werkstücks in Relation zum Scansystem betrachtet werden. Dabei ist es unerheblich, ob die Relativbewegung mit dem Scansystem oder mit dem Werkstück durchgeführt wird. Da das Scansystem den Bearbeitungsbereich festlegt, ist mit einer Vorzugslage auch gleichzeitig der Bearbeitungsbereich des Scansystems auf dem Werkstück definiert. Eine Vorzugslage kann demnach auch mit einer räumlichen Orientierung des Bearbeitungsbereichs eines Scansystems gleichgesetzt werden. Dieser ist, wie bereits beschrieben, für Scansysteme eine zweidimensionale Projektionsebene und für Scansysteme mit 3D-Fokuslagensteuerung, je nach verwendetem F-Theta-Objektiv, ein Quader oder ein Pyramidenstumpf. Im folgenden wird deshalb der Begriff Vorzugslage und Orientierung des Bearbeitungsbereichs des Scansystems relativ zum Werkstück synonym verwendet. In Bild 27 ist dieses Prinzip verdeutlicht. Die Orientierung und Ausrichtung des Bearbeitungsbereichs kann genau so frei gewählt werden wie die einer Vorzugslage, d. h. die Position und Orientierung im Raum ist durch die Limitierung der verwendeten Anlagenkinematik beschränkt.

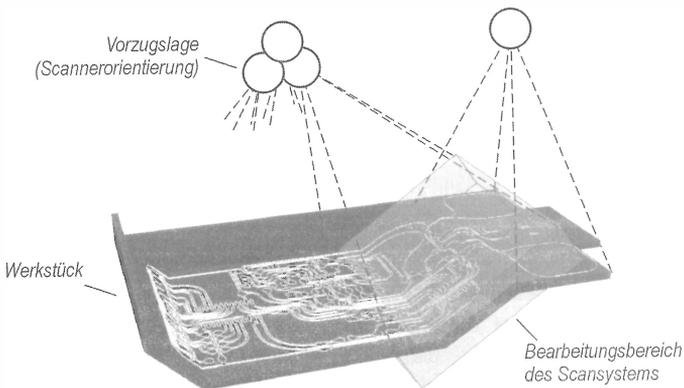


Bild 27: Äquivalenz von Vorzugslage und Bearbeitungsbereich des Scansystems

6.4.1 Bestimmung einer oberen und unteren Schranke

Eine Schwierigkeit, die bei der Suche nach dem globalen Optimum im Lösungsraum auftritt ist, daß die tatsächliche minimale Anzahl von Vorzugslagen, die für die vollständige Bearbeitung des Werkstücks benötigt werden, nicht bekannt ist. Der Optimierungsalgorithmus ist damit nicht in der Lage, die Qualität bisher gefundener Lösungen, d.h. den Abstand gefundener Lösungen vom Optimum, zu bewerten. Auch für die Terminierung des Algorithmus ist das Wissen um die minimale Anzahl von Vorzugslagen hilfreich. Der Algorithmus kann beendet werden, wenn das Optimum erreicht wurde oder die Abweichung der gefundenen Lösung vom Optimum hinreichend klein ist.

Als untere Schranke bezeichnet man einen Wert, der von einer optimalen Lösung eines Problems beziehungsweise dem Zielfunktionswert keinesfalls unterschritten werden kann. Insofern gewährleisten untere Schranken auch eine sinnvolle Abschätzung der Qualität vorliegender Lösungen. Die Angabe einer oberen Schranke ist relativ einfach möglich, da jede zulässige Lösung des Problems bereits eine obere Schranke darstellt. Das Problem besteht allerdings darin, eine untere Schranke für die Anzahl der minimal notwendigen Vorzugslagen anzugeben.

Hierfür wird ein zunächst widersprüchlicher Ansatz gewählt: das Optimierungsproblem wird größer gemacht, um die Bestimmung einer unteren Schranke zu vereinfachen. Ein größeres Problem das mehr Lösungen hat, kann z. B. erzeugt werden, indem die Randbedingungen des ursprünglichen Problems nicht mehr berücksichtigt werden. Damit ist die Lösungsmenge des ursprünglichen Problems mit Randbedingungen in dem des größeren Problems vollständig enthalten oder eingebettet; dieser Ansatz wird deshalb auch Einbettungsprinzip (*embedded technique*) genannt.

Jede Lösung des ursprünglichen Problems stellt damit auch eine Lösung des neuen Problems dar. Wird nun eine minimale Lösung des großen Problems gefunden, so besitzt sie damit auch geringere oder höchstens gleich große Kosten wie jede Lösung des ursprünglichen Problems und ist damit auch eine untere Schranke für den Optimalwert des ursprünglichen Problems. Allerdings ist die Bestimmung der unteren Schranke des größeren Problems aufgrund der fehlenden Randbedingungen erheblich einfacher, als die des ursprünglichen Problems.

6.4.2 Berechnung einer unteren Schranke von Vorzugslagen

Zur Berechnung einer oberen und unteren Schranke für die Anzahl der Vorzugslagen, die für eine vollständige Bearbeitung des Werkstücks benötigt werden, wird die Berechnung der Vorzugslagen ohne Berücksichtigung der Randbedingungen durchgeführt, d.h. ohne Kollisions-, Einfallswinkel- oder Erreichbarkeitsüberprüfungen. Dieser Ansatz stellt damit das größere Entscheidungsproblem dar, in das das eigentliche Bearbeitungsproblem eingebettet ist. Für die Berechnung einer oberen und unteren Schranke ist es allerdings notwendig, zwischen der Bearbeitung durch ein Scansystem ohne 3D-Fokuslagensteuerung (2D-Scansystem) und ein Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung (3D-Scansystem) zu

unterscheiden, da der Typ des Scansystems den größten Einfluß auf die Anzahl der benötigten Vorzugslagen besitzt.

Für die Berechnung einer unteren Schranke für 2D-Scansysteme sind, aufgrund der nur planaren Bearbeitungsmöglichkeit, ebene Bearbeitungsbereiche auf dem Werkstück zu identifizieren. Infolgedessen werden alle vorhandenen Laserbahnen zunächst krümmungsabhängig zergliedert und in ebene Bereiche mit gleichem Normalenvektor zusammengefaßt. Die Position und Orientierung der Ebenen richten sich nach den darin enthaltenen Laserbahnenabschnitten. Falls ein ebener Bereich in seinen Ausmaßen größer ist als der Bearbeitungsbereich des 2D-Scansystems, wird dieser Bereich solange geteilt, bis nur noch Bereiche vorhanden sind, die der maximalen Größe des Bearbeitungsbereichs des Scansystems entsprechen. Da für jede Ebene eine Vorzugslage für die Bearbeitung notwendig ist, stellt die Anzahl der berechneten Ebenen eine untere Schranke für das Bearbeitungsproblem mit einem 2D-Scansystem dar.

Die Berechnung für das Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung erfolgt analog zum 2D-Scansystem. Allerdings werden die Laserbahnen hier nicht in ebene, sondern in räumliche Bereiche von der Größe der Projektionsvolumen zusammengefaßt. Die untere Schranke ergibt sich durch den nach oben hin aufgerundeten Quotienten aus dem minimalen Gesamtvolumen, das alle Laserbahnen einnehmen und der Größe des maximalen Projektionsvolumens des jeweiligen Scansystems. Da für jedes Projektionsvolumen mindestens eine Vorzugslage für die Bearbeitung notwendig ist, stellt die Anzahl der berechneten Projektionsvolumen eine untere Schranke für das Bearbeitungsproblem mit einem 3D-Scansystem dar.

Die berechneten ebenen und räumlichen Bereiche stellen nur eine angenäherte Lösung dar und dienen in erster Linie zur Bestimmung einer unteren Schranke. Sie können aber als eine Startmenge für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden, da für die 2D-Scansysteme ebene Bereiche identifiziert wurden und für die 3D-Scansysteme eine volumen- bzw. laserbahnbezogene Aufteilung des Werkstücks vorgenommen wurde.

6.4.3 Ablage und Berechnung von Vorzugslagen

Bei der datentechnischen Ablage der Vorzugslagen bietet es sich an, die unterschiedlichen Geometrien der Bearbeitungsbereiche für die verschiedenen Scansysteme zu vereinheitlichen bzw. zu vereinfachen. Um den Fehler gering zu halten, darf die Geometrie aber nur insoweit vereinfacht werden, als daß sie von der realen Geometrieform nicht zu sehr abweicht. Zu unterscheiden sind die Bearbeitungsgeometrien von Scansystemen mit und ohne 3D-Fokuslagensteuerung sowie Systeme mit telezentrischem und nicht-telezentrischem F-Theta-Objektiv. Als rechnerinterne Gestalt des Bearbeitungsvolumens wurde daher ein Quader gewählt, um den Fehler zu minimieren.

Ein Fehler tritt zudem nur beim Einsatz eines 3D-Scansystems mit nicht-telezentrischem F-Theta-Objektiv auf, da hier der Bearbeitungsbereich in Form eines Pyramidenstumpfs auf einen Quader reduziert wird (Bild 28). Die Abweichung von der realen Geometrie ist durch den Winkel α festgelegt. Dieser Winkel ist aufgrund des Abstands zwischen Scansystem und Bearbeitungsbereich in der Regel sehr klein, so daß die Vereinfachung keine praxisrelevante

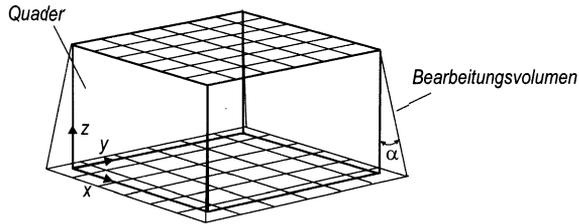


Bild 28: Rechnerinterne Abstraktion der Vorzugslagen durch einen Quader

Einschränkung darstellt. Zur rechnerinternen Abbildung einer Projektionsebene wird ebenfalls ein Quader verwendet: Die Höhe des Quaders wird hier allerdings nicht auf Null, sondern auf die Fokallänge des Laserstrahls gesetzt.

Die gewählte Vorgehensweise hat mehrere Vorteile. Zum einen kann die Ablage der Vorzugslagen damit effizienter und kompakter erfolgen. Zum anderen werden insbesondere die Rechenoperationen beschleunigt. Der Test, ob eine Laserbahn oder ein Laserbahnabschnitt im Bearbeitungsbereich einer Vorzugslage liegt, kann wesentlich schneller ausgeführt werden. Dies ist, aufgrund der hohen Anzahl dieser Tests beim Optimierungsvorgang, ein wichtiges Hilfsmittel bei der Reduzierung der Rechenzeiten.

Das im vorigen Abschnitt beschriebene Zusammenfassen von Laserbahnen bzw. -bahnabschnitten zu Vorzugslagen in Form von Quadern kann prinzipiell durch einen häufig gewählten Ansatz nach Foley und Van Dam [95] mit sogenannten achsparallelen Hüllquadern (*AABB*, *axis aligned bounding box*) erfolgen. Zur Berechnung der Hüllquader werden die Ortsvektoren der Laserbahnstützpunkte im Koordinatensystem, z. B. das des Werkstücks, betrachtet und für alle Laserbahnstützpunkte die minimalen bzw. maximalen Werte der x-, y- und z-Koordinaten berechnet. Die Minimum- und Maximumwerte in x-, y- und z-Achsenrichtung bilden die Endpunkte der Hauptdiagonalen des Hüllquaders, der die Laserbahnen ganz umfaßt.

Die achsparallelen Hüllquader können aufgrund der einfachen Berechnung sehr schnell ermittelt werden. Allerdings ist ihre Orientierung per Definition an die Achsen eines Koordinatensystems gebunden; sie können infolgedessen nur in x-, y- und z-Richtung im Raum verschoben werden. Zudem sind die Hüllquader durch die achsparallele Ausrichtung im Hinblick auf die Raumausnutzung nicht optimal. Da zudem die Vorzugslagen nicht der Beschränkung unterliegen, an den Achsen des Werkstückkoordinatensystems ausgerichtet zu sein, ist zum einen eine räumliche Orientierung der Hüllquader zu ermöglichen. Zum anderen ist der Verschnitt der achsparallelen Hüllquader zu minimieren, d.h. an den darin enthaltenen Objekten auszurichten. Für die Ablage und Berechnung der Vorzugslagen wurde daher ein anderer Weg gewählt, der beide Nachteile umgeht (Bild 29).

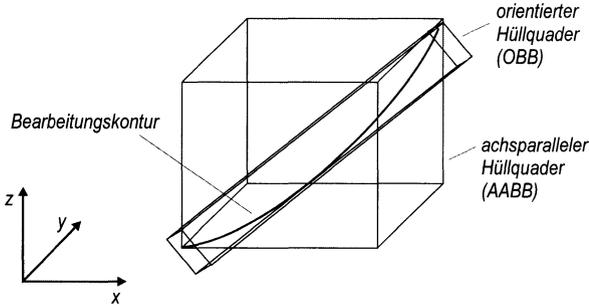


Bild 29: Vergleich eines achsparallelen mit einem orientierten Hüllquader am Beispiel einer Bearbeitungskontur

Orientierte Hüllquader (OBB, *oriented bounding box*) sind definiert durch ihren Mittelpunkt M und ihre räumlichen Ausrichtung, gegeben durch ein rechthändiges Koordinatensystem mit den Einheitsvektoren A_0 , A_1 und A_2 , den Längen a_0 , a_1 und a_2

$$\left\{ M + \sum_{i=0}^2 x_i A_i : |x_i| \leq |a_i| \right\} \quad (19)$$

sowie den Eckpunkten des Quaders

$$M + \sum_{i=0}^2 \sigma_i a_i A_i, \text{ mit } |\sigma_i| = 1. \quad (20)$$

Die räumliche Position und Orientierung des orientierten Hüllquaders relativ zu den Laserbahnen wird folgendermaßen bestimmt: Es wird zunächst der räumliche Mittelpunkt aller betrachteten Laserbahnen berechnet. Sei n die Anzahl und X die Menge aller Ortsvektoren der Laserbahnstützpunkte der Laserbahnen, damit ergibt sich der Mittelpunkt des Hüllquaders zu

$$M = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n X_j \quad (21)$$

Die Orientierung des Hüllquaders ergibt sich aus den normierten Eigenwerten der Kovarianzmatrix:

$$O = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} (X_j - M)(X_j - M)^T \quad (22)$$

Mit A_i als normierte Eigenvektoren ist die Länge entlang der einzelnen Achsen gegeben durch

$$a_i = \max_j |A_i \cdot (X_j - M)| \quad (23)$$

Der berechnete Hüllquader ist in der Regel kleiner als der maximale Bearbeitungsbereich des Scansystems und kann daher, etwa durch die Aufnahme neuer Laserbahnen, in seiner Größe noch zunehmen.

6.5 Metaheuristik für die Vorzugslagenoptimierung

Die Aufgabe dieser Optimierungsschicht ist es, eine minimale Anzahl von Vorzugslagen sowie ihre Lage und Orientierung zu ermitteln, mit denen eine vollständige, kollisionsfreie Bearbeitung aller Laserbahnen des Werkstücks möglich ist. Frei wählbare Parameter stellen dabei die Vorzugslagen da, deren Position und Orientierung im Raum beliebig gewählt werden kann und nur durch die kinematischen Limitierungen der Handhabungskinematik begrenzt sind. Zudem ist die minimale Anzahl der Vorzugslagen nicht bekannt.

6.5.1 Lösungsansatz

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl des Optimierungsverfahrens stellt insbesondere die Kollisionsrechnung dar. Eine Laserbahn kann einer Vorzugslage nur zugeordnet werden, wenn u.a. eine kollisionsfreie Bearbeitung möglich ist. Vor einer derartigen Zuordnung muß somit eine Kollisionsprüfung der gesamten Laserbahn durchgeführt werden. Aufgrund der hohen Kosten für die Kollisionsrechnung wirkt sich ein häufiger Test unmittelbar auf die Laufzeit des Algorithmus aus.

Einige bedeutende Optimierungsalgorithmen basieren darauf, möglichst viele Lösungen zu testen. Sie bearbeiten eine größere Anzahl von zulässigen Lösungen gleichzeitig oder suchen im Lösungsraum stochastisch nach Lösungen. Sie sind für das vorliegende Problem nur eingeschränkt anwendbar, da bereits die Bestimmung einer zulässigen Lösung für das vorliegende Problem verhältnismäßig teuer ist. Ihre Verwendung wäre demnach mit einem großen Rechenaufwand verbunden. Dies würde jedoch der Forderung widersprechen, im Hinblick auf die Planungszeiten praxisrelevante Interaktionszeiten zu gewährleisten.

Optimierungsverfahren, die jeweils nur eine kleine Lösungsmenge betrachten, haben die Eigenschaft, nur geringfügige Änderungen an der bisher erzielten Lösung vorzunehmen. Bei diesem Ansatz wird nur die nähere Umgebung der aktuellen Lösung abgesucht und die darin enthaltene beste Lösung als neuer Ausgangspunkt der Suche gewählt. Dieser Schritt wird iterativ durchgeführt, bis keine Verbesserungen mehr erzielt werden können. Diese Optimierungsverfahren versagen daher, wenn mehrere lokale Minima existieren, da sie zielgerichtet auf ein derartiges zusteuern. Eine Lösung sukzessiv zu verbessern, birgt somit die Gefahr, in einem lokalen Optimum zu landen, das weitab vom globalen Optimum liegen kann: eine Lösung, die nicht besonders gut ist, aber durch keine einzelne der verfügbaren Änderungen besser werden kann.

Ein wichtiges Kriterium für ein Optimierungsverfahren ist es daher, die lokale Suche über lokale Minima hinweg fortzusetzen zu können. Man muß also zulassen, daß auch eine schlechtere Lösung akzeptiert, oder ab und zu per Zufall eine völlig neue Lösung erzeugt

wird. Für diese Optimierungsstufe wurde daher ein Optimierungsverfahren entwickelt, das auf dem Prinzip der sogenannten Metaheuristiken basiert und die genannten Kriterien erfüllt.

6.5.2 Aufbau der Metaheuristik

Metaheuristiken sind iterative Optimierungsverfahren, die aus einer untergeordneten Heuristik und einer überwachenden, übergeordneten Heuristik bestehen. Als untergeordnete Heuristiken werden häufig lokale Optimierungsverfahren eingesetzt, die zur Erkundung und zur Bewegung im Suchraum dienen und zulässige Problemlösungen in der Nachbarschaft der aktuell vorliegenden Lösungen identifizieren. Die übergeordnete Heuristik steuert die Richtung dieser Bewegung und ist in der Lage, lokale Minima wieder verlassen zu können.

Der Aufbau der entwickelten Metaheuristik ist in Bild 30 dargestellt. Zu Beginn des Verfahrens werden die aus der Berechnung der unteren Schranke ermittelten Vorzugslagen herangezogen und nun unter Berücksichtigung der Randbedingungen überprüft. Das Ergebnis dieser Überprüfung stellt allerdings noch keine Lösung für das Optimierungsproblem dar, sondern dient als Ausgangspunkt für die untergeordnete Heuristik. Die Aufgabe dieser Heuristik ist es, neue, zulässige Lösungen in definierter Nachbarschaft zu vorhergehenden Lösungen zu generieren, mit dem Ziel, mit einer oder mehreren generierten Problemlösungen einen möglichst guten Zielfunktionswert zu realisieren. Diese Lösungen werden anschließend von der übergeordneten Heuristik hinsichtlich der Zielkriterien bewertet und eine Lösung als Optimum akzeptiert oder die untergeordnete Heuristik mit neuen Vorgaben erneut aufgerufen.

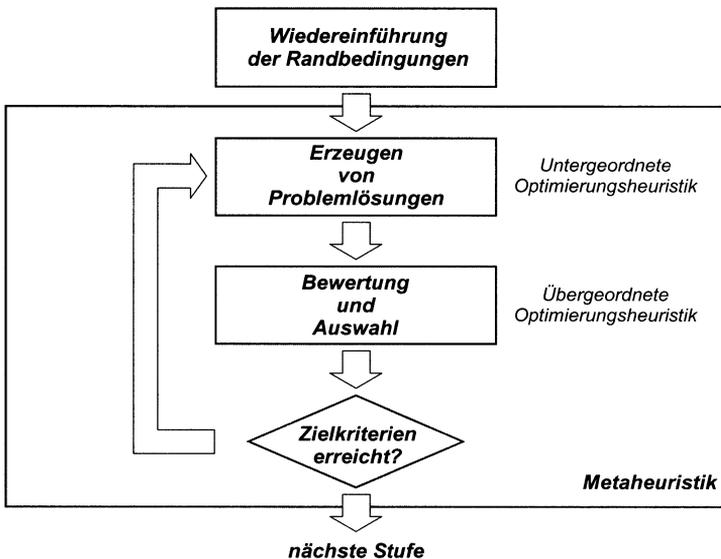


Bild 30: Aufbau der Metaheuristik

6.5.3 Erzeugung einer Startmenge für die untergeordnete Heuristik

Vor dem Beginn des Optimierungsverfahrens ist es notwendig, eine Startmenge zu erzeugen, mit der der untergeordnete Optimierungsalgorithmus operieren und seine Arbeit aufnehmen kann. Die Startmenge kann auf verschiedene Weise erzeugt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, für jede Laserbahn eine eigene Vorzugslage zu berechnen, um eine möglichst anpassungsfähige und unabhängige Startmenge zu erhalten. Allerdings würden damit die Informationen über die Bearbeitungsbereiche verloren gehen, die bei der Berechnung der unteren Schranke gewonnen wurden. Einer Nutzung der räumlichen Nachbarschaftsbeziehung zwischen Laserbahnen liegt der Gedanke zugrunde, daß in optimal oder fast-optimalen Lösungen, Laserbahnen auch überwiegend mit relativ nahen Nachbarn gemeinsam in einer Vorzugslage liegen.

Ein weiterer Vorteil von Relaxationen, d.h. Lösungen ohne Berücksichtigung der Randbedingungen zur Bestimmung einer unteren Schranke, liegt darin, daß sie auch als Ausgangspunkt für die Konstruktion guter zulässiger Lösungen dienen können. Dies geschieht, indem die Lösung der Relaxation so modifiziert wird, daß die zuvor vernachlässigten Restriktionen des Ausgangsproblems wieder Beachtung finden. Hierfür werden die berechneten Vorzugslagen zur Bestimmung der unteren Schranke und alle darin enthaltenen Laserbahnen nun hinsichtlich der Randbedingungen überprüft.

Ob eine Vorzugslagenorientierung überhaupt eingenommen werden kann, kann mit der Rücktransformation der Anlagenkinematik verifiziert werden. Falls eine Vorzugslage diese Randbedingung nicht erfüllt, werden alle darin enthaltenen Laserbahnen entnommen und die Vorzugslage gelöscht, ansonsten werden alle darin enthaltenen Laserbahnen einzeln getestet. Laserbahnen die nicht erreicht oder nur kollisionsbehaftet erreicht werden können, werden aussortiert und gemeinsam mit allen anderen Laserbahnen ohne eine zugehörige Vorzugslage in einem Pool zusammengefaßt. Grundsätzlich gilt, daß jede Verletzung der Randbedingungen zu einem Aussondern der betroffenen Laserbahnen aus der jeweiligen Vorzugslage führt.

6.5.4 Untergeordnete Optimierungsheuristik

Die Aufgabe der untergeordneten, lokalen Optimierungsheuristik besteht darin, im Lösungsraum eine lokale Suche und Bewertung durchzuführen und eine gültige Lösungsmenge zu erzeugen. Die Ausgangsmenge der lokalen Optimierungsheuristik besteht aus gültigen Vorzugslagen mit darin befindlichen, kollisionsfrei bearbeitbaren Laserbahnen sowie einem externen Pool von Laserbahnen, die aufgrund von Verletzungen der Randbedingungen aus ihrer Vorzugslage herausgenommen wurden und daher aktuell keiner Vorzugslage zugeordnet sind. Die Ausgangsmenge ist daher zunächst in eine oder mehrere gültige Lösungsmengen zu überführen, die anschließend hinsichtlich ihrer jeweiligen Eigenschaften zu bewerten sind.

Die Anfangsmenge wird in eine oder mehrere gültige Lösungsmengen überführt, indem die Laserbahnen ohne zugeordnete Vorzugslage aus dem Pool entnommen werden und versucht wird, sie bereits bestehenden Vorzugslagen zuzuordnen. Dieser Vorgang wird mit allen

Laserbahnen durchgeführt, die sich im Pool befinden. Die Zuordnung der Laserbahnen zu den Vorzugslagen kann auf dieser Ebene nur nach lokal-optimierenden Kriterien getroffen werden und zielt zunächst auf die Minimierung der Anzahl der Vorzugslagen ab. Laserbahnen können allerdings nur in eine Vorzugslage aufgenommen werden, wenn gleichzeitig alle Randbedingungen erfüllt sind.

Um eine Laserbahn in eine bestehende Vorzugslage aufzunehmen, müssen daher zuvor alle Randbedingungen einzeln getestet werden. Die Aufnahme in eine Vorzugslage und der Test auf Einhaltung der Randbedingungen erfolgt nicht separat, sondern gleichzeitig, damit zu einem späteren Zeitpunkt nicht alle in der Vorzugslage befindlichen Laserbahnen getestet werden müssen:

Erreichbarkeit

Eine Laserbahn kann in eine Vorzugslage nur aufgenommen werden, wenn sie vollständig im maximalen Bearbeitungsbereich des Scansystems liegt. Dies kann zum einen überprüft werden, indem sich alle Laserbahnstützpunkte innerhalb des Bearbeitungsbereichs des Scansystems befinden. Damit befindet sich dann auch die gesamte Laserbahn innerhalb der Reichweite des Scansystems. Zum anderen können alle Randflächen des maximalen Bearbeitungsbereichs auf eine Durchdringung mit der Laserbahn überprüft werden. Tritt keine Durchdringung mit der Laserbahn auf, so ist die Laserbahn vollständig im Bearbeitungsbereich enthalten und damit vom Scansystem erreichbar.

Einfallswinkel

Um einen hinreichend senkrechten Einfallswinkel bei der Bearbeitung der Laserbahn sicherzustellen, ist hierfür zunächst das Werkstück gegenüber der Vorzugslage oder die Vorzugslage gegenüber dem Werkstück auszurichten, je nach verwendeter Anlagenkinematik. Anschließend werden die Bearbeitung der Laserbahn mit dem Scansystem überprüft und der Einfallswinkel berechnet.

Kollisionsfreiheit

Für den Kollisionstest werden die kinematische Ausgangslage nach dem Einfallswinkeltest benutzt und die Bearbeitung der Laserbahn mit dem Werkstück- und dem Anlagenmodell auf eine Kollision zwischen dem Laserstrahl, dem Werkstück sowie peripheren Objekten, etwa Spannmittel, hin überprüft.

Bei der Aufnahme einer Laserbahn in eine Vorzugslage könnte eine erneute Berechnung des Hüllquaders durchgeführt werden, nun mit der aufgenommenen Laserbahn. Dies kann aber zu einer neuen Orientierung und räumliche Verschiebung des Hüllquaders bzw. der Vorzugslage führen. Damit ist aber verbunden, daß für alle darin enthaltenen Laserbahnen wieder ein Test auf Randbedingungen stattfinden muß, da sich der Einfallswinkel geändert hat oder nun Kollisionen auftreten, die vorher nicht stattgefunden haben.

Daher wird bei der Aufnahme einer neuen Laserbahn nicht der Hüllquader neu berechnet, sondern der Hüllquader entsprechend vergrößert, um die Laserbahn aufnehmen zu können. Es

bleibt daher die Orientierung, d.h. das lokale Koordinatensystem A , unverändert – es werden nur die Längen a_i des Hüllquaders erneut berechnet, um die Laserbahn aufnehmen zu können.

Grundsätzlich gilt, daß aufgrund der kinematischen Limitierung des Scansystems bei der Verletzung einer der Randbedingungen nur eine andere Vorzugslage für die Laserbahn gewählt werden kann, d.h. nur durch eine Umorientierung der Handhabungskinematik bearbeitet werden kann. Es tritt aber auch der Fall auf, daß eine Laserbahn mehreren Vorzugslagen zugeordnet werden kann. Es muß daher entschieden werden, in welche Vorzugslage die Laserbahn aufgenommen werden soll.

Aus diesem Grunde findet parallel zum Randbedingungstest auch eine Bewertung statt. Die Bewertung entspricht den Kosten, die entstehen, eine Laserbahn in eine Vorzugslage aufzunehmen und ist als Wert der Volumenzunahme des Hüllquaders nach der Aufnahme der Laserbahn definiert. Eine Laserbahn, die aufgenommen werden kann, ohne daß die Größe des Hüllquaders wächst, erhält damit die niedrigsten Kosten. Es werden daher benachbarte Laserbahnen bevorzugt aufgenommen, was dem bereits genannten Nachbarschaftsprinzip in einer optimalen oder fast-optimalen Lösung entspricht.

Die Ergebnisse aller Bewertungen werden in einer Kostenmatrix zusammengefaßt, wie sie in Bild 31 dargestellt ist. Bei einer Verletzung der Randbedingung wird dies ebenfalls in der Kostenmatrix vermerkt und der entsprechende Grund eingetragen. Mit der Kostenmatrix

$$B \in R^{n \times m} \cup \{A, E, K\} \quad (24)$$

- mit n : Anzahl der Laserbahnen
 m : Anzahl der Vorzugslagen
 A : Randbedingung „Erreichbarkeit“ nicht erfüllt
 E : Randbedingung „Einfallswinkel“ nicht erfüllt
 K : Randbedingung „Kollisionsfreiheit“ nicht erfüllt

kann nun eine optimale Zuordnung der Laserbahnen zu den Vorzugslagen erfolgen, indem jeweils für jede Laserbahn die Vorzugslage mit dem günstigsten Wert ausgewählt wird. Für die Elemente dieser Bewertungsmatrix gilt

$$b_{ij} \in R \cup \{K, A, E\}, \text{ für } i \in \{1, \dots, n\}, j \in \{1, \dots, m\}. \quad (25)$$

Wenn man nun für solche Paare (i, j) , für die keine Bewertung vorgenommen werden konnte, als Kosten den Wert „Unendlich“ festlegt, lauten die relevanten Bewertungen damit

$$m_k = \min_{j \in \{1, \dots, m\}} b_{kj}, \text{ wobei } k \in \{1, \dots, n\}. \quad (26)$$

Im Zusammenhang mit der Zuordnung von Laserbahnen zu Vorzugslagen mit Hilfe der Kostenmatrix wird ein globaler Schwellwert eingeführt, der verhindert, daß Laserbahnen unter zu hohen Kosten, trotz Erfüllung der Randbedingungen, zugewiesen werden. Mit einer solchen Laserbahn wird so verfahren, als wenn sie die Randbedingungen nicht erfüllt hätte und dem Pool zugeordnet.

	VZL ₁	VZL ₂	VZL ₃	VZL ₄		VZL _m
LB ₁	0,72	6,64	K	2,42		5,48
LB ₂	2,51	E	8,94	0,00		2,29
LB ₃	3,93	0,11	7,51	1,74	...	A
LB ₄	0,23	9,36	E	8,81		K
LB ₅	A	2,55	0,00	1,06		2,94
		⋮				
LB _n	0,58	A	0,27	A		3,63

LB: Laserbahn
 VZL: Vorzugslage
 n: Anzahl der Laserbahnen
 m: Anzahl der Vorzugslagen
Randbedingungen:
 A: Erreichbarkeit
 E: Einfallswinkel
 K: Kollision

Bild 31: Aufbau der Kostenmatrix

Bei der Durchführung des Randbedingungstests können einige Eigenschaften zur Geschwindigkeitssteigerung ausgenutzt werden, die die Erstellung der Kostenmatrix beschleunigen:

- Sobald während der Durchführung eines der Tests festgestellt wird, daß eine Bedingung verletzt wird, kann sofort der Test abgebrochen und auf eine weitere Überprüfung verzichtet werden, da dies nicht kompensiert werden kann.
- Beim Randbedingungstest wird zunächst der Erreichbarkeits-, dann der Einfallswinkel und als letztes der Kollisionstest ausgeführt, da er am rechenintensivsten ist. Dies hat den Vorteil, daß bei der Nichterfüllung einer der beiden anderen Randbedingungen der teure Kollisionstest nicht durchgeführt werden braucht.
- Alle Ergebnisse des Randbedingungstests werden mitprotokolliert, damit ein erneuter Test bei späteren Iterationen nicht wieder durchgeführt werden muß. Bei jeder Verletzung einer Randbedingung wird ein Tripel, bestehend aus einem Verweis auf die Laserbahn, einem Verweis auf die Vorzugslage und dem dazugehörigen Grund, in eine Liste aufgenommen. Solange die Vorzugslage existiert, bleibt dieser Eintrag erhalten. Beim Aufbau der Kostenmatrix wird anhand der Liste geprüft, ob das Paar, bestehend aus Laserbahn und Vorzugslage, bereits früher schon einmal getestet wurde, so daß ein nochmaliger Randbedingungstest vermieden werden kann.

Eine Lösung stellt erst dann eine Gesamtlösung des Problems dar, wenn alle Laserbahnen einer Vorzugslage zugeordnet sind und auch darin bearbeitet werden können. Insofern muß am Ende des untergeordneten Optimierungsverfahrens das Pool leer sein, da ansonsten noch Laserbahnen ohne zugehörige Vorzugslage existieren. Wenn sich im jeweiligen Iterationsschritt noch Laserbahnen im Pool befinden, bedeutet dies, daß die aktuellen Vorzugslagen nicht derart das Werkstück abdecken, daß eine gesamte Bearbeitung möglich ist und für diese Laserbahnen neue Vorzugslagen erzeugt werden müssen. Durch die

Berechnung neuer Vorzugslagen beziehungsweise Handhabungsstellungen können die Laserbahnen, die bisher nicht bearbeitet werden konnten, in eine günstige Orientierung überführt werden.

Hierzu wird für jede Laserbahn im Pool zunächst eine eigene Vorzugslage berechnet und mit beiden Mengen erneut eine Kostenmatrix aufgestellt, mit dem Ziel, eine geeignete Zuordnung bzw. Gruppierung von Laserbahnen zu neuen Vorzugslagen zu bestimmen und die Anzahl neuer Vorzugslagen zu minimieren. Nach der Berechnung einer Vorzugslage für eine Laserbahn im Pool muß allerdings zunächst überprüft werden, ob die gewünschte Orientierung auch von der Anlagenkinematik erreicht werden kann. Hierzu wird die inverse Kinematik der Handhabungskinematik herangezogen und versucht, die Orientierung zu erreichen. Ist dies nicht der Fall, so werden die Achsen, deren Limitierungen überschritten wurden, auf ihrem jeweiligen Maximalwert gestellt. Anschließend wird die Laserbahn aus dieser Vorzugslage hinsichtlich ihrer Randbedingungen überprüft. Ist eine Bearbeitung auch damit nicht möglich, so wird die betroffene Laserbahn für den Benutzer als nicht bearbeitbar markiert und im weiteren Verlauf nicht mehr betrachtet.

Von Fall zu Fall kann es vorkommen, daß sich eine Laserbahn in einem stark kollisionsbehafteten Bereich auf dem Werkstück befindet. Ist eine durchgängige Bearbeitung nicht möglich, so ist nur für die kollisionsbehafteten Bereiche der Laserbahn eine neue Vorzugslage zu erzeugen. Ist dies auch nicht durchführbar, so werden allein für die kollisionsbehafteten Abschnitte Orientierungen des Laserstrahls gesucht, die kollisionsfrei sind und daraus Vorzugslagen gebildet. Vorzugslagen, die durch einen solchen Vorgang entstanden sind, werden gekennzeichnet und in der weiteren Planung bevorzugt berücksichtigt. Andernfalls werden die kollisionsbehafteten Bereiche der Laserbahn als nicht bearbeitbar markiert und diese Information nach der Planungsphase dem Benutzer zur Anzeige gebracht.

Das Ergebnis der untergeordneten Heuristik stellt eine gültige Lösung für das gesamte Bearbeitungsproblem dar. Prinzipiell könnte daher bereits zu diesem Zeitpunkt die Vorzugslagenoptimierung beendet und zur nächsten Stufe übergegangen werden. Allerdings handelt es sich hierbei nicht unbedingt um eine gute Lösung. Da die Lösung nur nach lokal-optimierenden Kriterien entwickelt worden ist, kann die ermittelte Lösung weitab vom globalen Optimum liegen.

6.5.5 Übergeordnete Optimierungsheuristik

Die untergeordnete Heuristik generiert bei jedem Aufruf eine gültige Lösung, bei der alle Laserbahnen einer Vorzugslage zugeordnet sind. Diese Lösung wird jedesmal dann von der übergeordneten Optimierungsheuristik gesichert, wenn eine bessere Lösung als bisher erreicht worden ist. Durch diesen Ansatz kann der Berechnungsvorgang jederzeit unterbrochen und die bis dahin berechnete beste Lösung in der nächsten Hierarchiestufe weiterverwendet werden. Da es sich aber bei der bisher besten gefundenen Lösung nicht notwendigerweise um eine optimale Lösung handelt, hat die übergeordnete Heuristik insofern die Aufgabe, das bisher erzielte Ergebnis zu verbessern. Es wird dabei zwischen monotonen

Verbesserungsverfahren – welche in jedem Schritt ihres Ablaufs ausschließlich Lösungsverbesserungen zulassen – und nicht-monotonen Verbesserungsverfahren unterschieden. Nicht-monotone Verfahren dulden im Verfahrensablauf auch Verschlechterungen der Lösungsqualität und können so ein ggf. erreichtes lokales Optimum auch wieder verlassen. Durch diese Eigenschaft soll verhindert werden, daß sich der heuristische Lösungsprozeß dauerhaft in einem lokalen Optimum fängt und darin terminiert.

Eine Optimierung im Sinne der Zielsetzung findet nur statt, wenn die Anzahl der Vorzugslagen minimiert wird. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Anzahl der Vorzugslagen besteht darin, einen Wechsel von Laserbahnen zwischen den Vorzugslagen durchzuführen, mit dem Ziel, daß eine Vorzugslage soweit Laserbahnen abgibt, bis keine Laserbahnen mehr darin enthalten sind und die Vorzugslage entfernt werden kann. Dieser Ansatz ist jedoch hinsichtlich seiner Konvergenzeigenschaften schwierig zu kontrollieren.

Besser ist es, gezielt "schwache" Vorzugslagen explizit aufzugeben und die darin enthaltenen Laserbahnen anderen Vorzugslagen zuzuordnen. Die Wahl der auszuschließenden Vorzugslage wird durch eine heuristische Analyse hinsichtlich ihrer Eigenschaften vorgenommen, wobei sich die folgenden Ausführungen hauptsächlich auf die Bearbeitung mit einem 3D-Scansystem beziehen. Für 2D-Scansysteme werden Vorzugslagen nur verschmolzen, wenn sie den gleichen Normalenvektor haben und in einer Ebene liegen. Anderenfalls können die Vorzugslagen nicht zusammengefaßt werden, da eine gemeinsame Bearbeitung nicht möglich ist, sondern nur, wenn eine Umorientierung mit der Handhabungskinetik stattfindet.

Für 3D-Scansysteme ist es prinzipiell sinnvoll, kleinere Vorzugslagen zu terminieren, damit ihre Laserbahnen in größere Vorzugslagen wechseln können. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn sich kleinere Vorzugslagen mit einer Größeren überlappen oder sogar vollständig darin enthalten sind. Generell ist eine starke Überlappung von Vorzugslagen ein Hinweis darauf, in diesem Bereich verstärkt Vorzugslagen zu terminieren. Bei einer zu terminierenden Vorzugslage werden alle darin enthaltenen, freiwerdenden Laserbahnen dem Pool zugeordnet und die Vorzugslage gelöscht. Auf diese, nun nicht mehr gültige Lösung, kann wieder die untergeordnete Heuristik angewendet werden.

Allerdings besteht grundsätzlich die Schwierigkeit, stark kollisionsbehaftete Laserbahnen in andere Vorzugslagen unterzubringen. Daher hat sich als sinnvoll erwiesen, Vorzugslagen, die aus derartigen Laserbahnen hervorgegangen sind, beizubehalten und die in der Umgebung liegenden Vorzugslagen zu terminieren. Diese Bewertung begegnet dem Effekt, erneut Kollisionen auflösen zu müssen. Daher werden derartige Vorzugslagen als Basis für die Aufnahme umgebender Laserbahnen bevorzugt.

Ein weitaus leistungsfähigerer Ansatz als die sequentielle Terminierung von Vorzugslagen, kann durch folgende Betrachtung gewonnen werden: Die untergeordnete Heuristik basiert lediglich auf einer elementaren Zuordnungs- und Ausweichstrategie. Die Leistungsfähigkeit wird aber deutlich, wenn dieser Ansatz im Zusammenhang mit der Terminierungsstrategie der übergeordneten Heuristik betrachtet wird. Durch das Konzept des Pools besteht für die übergeordnete Heuristik ein erheblicher Freiraum, der dazu genutzt werden kann, nicht nur

eine einzelne Vorzugslage aufzugeben, sondern gezielt einzelne Laserbahnen in den Pool zu transferieren, es aber auch erlaubt, eine Gruppe von Vorzugslagen parallel zu terminieren.

So wird eine Gruppe von Vorzugslagen, die gemeinsam nicht größer sind als der maximale Bearbeitungsbereich des 3D-Scansystems, gemeinsam gelöscht. Eine Variante besteht nun darin, aus allen, in der Vorzugslagengruppe befindlichen Laserbahnen, eine neue, aber leere Vorzugslage zu generieren. Die Laserbahnen werden dem Pool zugeordnet, um die Randbedingungen für die Aufnahme in die neue Vorzugslage zu überprüfen. Mit diesem Prinzip konkurrieren umliegende Vorzugslagen, gemeinsam mit der neuen Vorzugslage, um die im Pool befindlichen Laserbahnen.

Der kombinierte Ansatz zweier Heuristiken wird aber auch noch dahingehend genutzt, indem mehrere Alternativen oder Kombinationen der genannten Auswahlstrategien gleichzeitig auf eine Ausgangslösung angewendet und an die unterliegenden Heuristik zur Bewertung übergeben werden. Anschließend werden die zurückgegebenen Lösungen nach ihrer Anzahl an Vorzugslagen sortiert und als Ausgangspunkt für die weitere Optimierung genutzt. Insofern wird durch die kombinierte Anwendung einer Laserbahnzuordnungs- und einer Vorzugslagenauswahlstrategie eine leistungsfähige Gesamtheuristik erzeugt.

Heuristische Regeln können einerseits als fest bzw. unveränderbar definiert sein. Andererseits ist es auch möglich, eine Variation der Regeln innerhalb vorab festgelegter Grenzen zuzulassen. Diese Variation betrifft nicht die Formulierung der Regeln selber, sondern die in den Regeln integrierten, ansonsten als konstant anzusehenden numerischen Werte, die nun variabel gehalten werden. Eine solche begrenzte Einflußnahme auf das heuristische Regelwerk wird Parametrisierung genannt. Durch eine geeignete Parametrisierung der Laserbahnzuordnungs- und Vorzugslagenauswahlstrategie kann die erreichbare Lösungsgüte sowie der dazu nötige Rechenzeitbedarf für den Gesamtaufwand der Vorzugslagenminimierung, etwa von einem Benutzer, flexibel gesteuert werden:

- Der Benutzer kann einen Schwellwert festlegen, ab dem die Zuordnung einer Laserbahn zu einer Vorzugslage verweigert wird und im Pool verbleibt, auch wenn alle Randbedingungen erfüllt sind. Dies stellt eine zusätzliche Randbedingung dar, die aber flexibel gewählt werden kann.
- Mit der Suchtiefe wird vorgegeben, wie häufig eine Iteration zwischen der unter- und der übergeordneten Heuristik beziehungsweise wie tief von einer ausgehenden Lösung aus gesucht werden darf.
- Mit der maximalen Anzahl gleichzeitig zu terminierender Vorzugslagen bzw. gleichzeitig zu berechnender Alternativen läßt sich die Suchbreite beschränken. Ein einfaches Heraufsetzen dieser Werte führt allerdings zu einem höheren Rechenzeitbedarf. Wird die Anzahl zu niedrig gewählt, so läuft das Verfahren aber oft in lokale Minima mit geringer Lösungsqualität.

Der Berechnungsaufwand ist insbesondere dann erheblich, wenn für die Parameter Suchtiefe und -breite hohe Werte gewählt werden. Allerdings wurde festgestellt, daß der weitaus größte Rechenzeitanteil auf den Kollisionstest entfällt. So können bei der

Bearbeitungsplanung eines räumlich einfachen Werkstücks die Parameter auf höhere Werte eingestellt werden, wenn Kollisionen ausgeschlossen werden können und der Bediener den Kollisionstest ausgeschaltet hat.

Ein lokales Optimum kann prinzipiell daran erkannt werden, daß es kaum noch oder gar keine neuen erfolgreichen Lösungen gibt. Um einem lokalen Minimum wieder entweichen zu können und nicht darin terminieren zu müssen, stehen verschiedene Strategien zur Auswahl. Zur Generierung einer neuen Ausgangslösung werden kurzfristig – insbesondere dann, wenn sich im Laufe der Zeit eine Lösung nicht mehr wesentlich verbessert und auf Veränderungen nicht mehr sensibel reagiert wird – Vorzugslagen auch zufällig terminiert, die Parameter Suchtiefe und –breite erhöht und akzeptiert, daß sich die Lösungen verschlechtern. Bei genügender Abweichung vom bisherigen Minimum steuert das Verfahren anschließend auf ein anderes Sub- oder sogar das absolute Optimum zu. Eine andere Methode realisiert eine neue Ausgangslösung, indem alle Laserbahnen in den Pool verschoben aber die Vorzugslagenpositionen beibehalten werden. Der Vorteil ist, daß es hierdurch allen Laserbahnen, die bisher an eine bestehende Vorzugslage gebunden waren, jetzt ermöglicht wird, einer günstigeren Vorzugslage zugeordnet zu werden. Ein weiterer Vorteil dieses Prinzips besteht darin, daß für stark kollisionsbehaftete Laserbahnen keine erneute Suche nach einer kollisionsfreien Vorzugslage durchgeführt werden braucht, da die bestehenden Vorzugslagenpositionen beibehalten werden. Dadurch, das eine Liste existiert, in der alle Ergebnisse des Randbedingungstests zwischen Laserbahnen und noch bestehenden Vorzugslagen enthalten sind, hält sich der Rechenaufwand hierfür in Grenzen.

Das Verfahren terminiert nach der Erfüllung eines als Parameter vorgegebenen Stoppkriteriums: nach einer bestimmten Anzahl von Iterationen, einer bestimmten Rechenzeit oder wenn ein bestimmter Abstand zu der unteren Schranke erreicht ist. Diese Abbruchkriterien sichern der Metaheuristik eine endliche Laufzeit. Die hinsichtlich der Lösungsqualität vorteilhafteste, aller bis zu diesem Zeitpunkt generierten Lösungen, wird als Ergebnis ausgewiesen. Eine Lösung, die die untere Schranke erreicht, stellt eine globale Optimallösung dar.

6.6 Verfahrwegminimierung zwischen Vorzugslagen

Für eine vollständige Bearbeitung des Werkstücks sind im Laufe des Bearbeitungsvorgangs alle berechneten Vorzugslagen einzunehmen. Die hierfür notwendigen Relativbewegungen zwischen Werkstück und Scansystem werden durch die Handhabungskinematik ausgeführt. Da eine Relativbewegungen von Vorzugslage zu Vorzugslage unabhängig von allen anderen durchführbar ist, bedeutet dies, daß sie prinzipiell in einer beliebigen Reihenfolge durchgeführt werden können. Durch die Vorzugslagenplanung wurde zwar eine Menge von Vorzugslagen bestimmt, aber die Reihenfolge, in der die Vorzugslagen angefahren werden sollen, ist hier noch nicht definiert. Eine zufällig gewählte Reihenfolge würde allerdings die Bearbeitungsdauer des Werkstücks verlängern.

Die Aufgabe dieser Optimierungsschicht ist es daher, eine optimale Reihenfolge von Vorzugslagen zu finden, so daß die Bearbeitungsdauer minimiert wird. Die Reihenfolge der

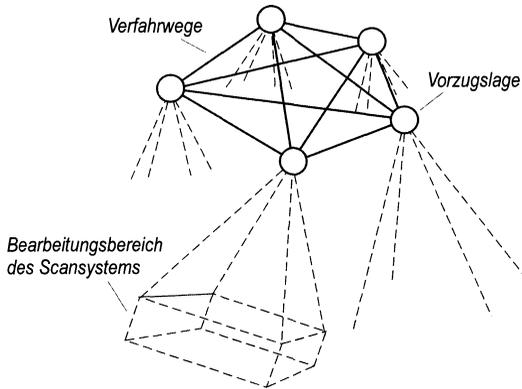


Bild 32: Mögliche Fahrwege zwischen den berechneten Vorzugslagen

Vorzugslagen ist daher so zu wählen, daß zwischen allen Vorzugslagen ein möglichst kurzer Gesamtfahrweg entsteht (Bild 32). Die vorliegende Problemstellung entspricht somit dem bereits genannten, NP-vollständigen TSP-Problem mit exponentiell steigendem Rechenaufwand. Daher kann nur bei einer geringen Anzahl von Vorzugslagen eine vollständige Enumeration durchgeführt werden, mit dem Ziel, das exakte Minimum zu erhalten.

Für die Lösung des klassischen TSP-Problems werden zwei verschiedene Typen von Heuristiken, konstruktive sowie optimierende Heuristiken, oft auch in Kombination miteinander, eingesetzt. Konstruktive Heuristiken erzeugen eine mehr oder weniger gute Lösung des Problems. Typische konstruktive Heuristiken sind die „Bester Nachfolger“-Verfahren und die Einfügeverfahren:

Bester Nachfolger-Verfahren

Bei dem „Bester Nachfolger“-Verfahren (*nearest neighbour*) wird, ausgehend von einer beliebig gewählten Vorzugslage, die jeweils am kostengünstigsten zu erreichende Vorzugslage aller noch nicht besuchten Vorzugslagen als nächstes ausgewählt und dies so lange fortgesetzt, bis alle Vorzugslagen erreicht wurden. Da die Zahl der möglichen Nachfolger im Verlauf des Verfahrens ständig abnimmt, d. h. der Freiheitsgrad sinkt, müssen zum Ende des Verfahrens oft ungünstige Reihenfolgen in die Lösung aufgenommen werden. Dadurch führt das Verfahren meistens zu relativ schlechten Ergebnissen.

Farthest Insertion

Hier wird als nächste Vorzugslage jeweils die teuerste Vorzugslage ausgewählt und optimal in die bereits besuchten Vorzugslagen eingefügt.

Cheapest Insertion

Von allen, noch nicht besuchten Vorzugslagen, wird diejenige als nächste ausgesucht, deren Einfügen in die Liste der bereits besuchten Vorzugslagen am wenigsten Kosten verursacht.

Optional kann auf die erste heuristische Lösung noch eine optimierende Heuristik angewandt werden. Optimierende Heuristiken haben die Aufgabe, die Lösung schrittweise zu optimieren und nehmen Verbesserungen an der Lösung durch Reihenfolgeänderungen vor. Bekannte optimierende Heuristiken sind in diesem Zusammenhang die Kanten- und Knotenaustauschverfahren (k -opt-Verfahren) [96], aber auch Simulated Annealing und die Evolutionären Algorithmen. Bei den k -optimalen Verfahren handelt es sich um Vertauschungsverfahren, bei denen in jeder Iteration versucht wird, die aktuelle Lösung durch den Austausch von Kanten oder Knoten zu verbessern. Die Menge der zu entfernenden und die Menge der aufzunehmenden Elemente müssen nicht disjunkt sein. Tritt eine Verbesserung der Lösungsqualität ein, so wird die Änderung übernommen. Ist es nicht mehr möglich, durch Ersetzen von k Elementen einer Lösung durch k andere eine bessere Lösung zu finden, so ist die gefundene Lösung k -optimal. Die Verfahren Simulated Annealing und Evolutionäre Algorithmen wurden bereits im Abschnitt 6.2 vorgestellt.

Um eine Minimierung der Bearbeitungsdauer vornehmen zu können, ist zuvor eine Gewichtung für den Übergang von einer Vorzugslage in eine andere Vorzugslage zu bestimmen. Sie entspricht der Zeit, welche die Handhabungskinematik benötigt, um von einer Achsstellung in eine andere zu gelangen. Für die Bewertung werden insofern die zurückgelegten Achswege unter Berücksichtigung der maximalen Achsgeschwindigkeiten der jeweiligen Achse betrachtet, wobei die Achse mit der längsten Verfahrtdauer die Kosten bestimmt.

Zu beachten ist, daß eine einfache Differenzbildung der einzelnen Achswerte zwischen Anfangs- und Endstellung nicht ausreicht, da hierbei zum einen nicht zwischen rotatorischen und translatorischen Achsen unterschieden wird und zum anderen auch die unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten der einzelnen Achsen nicht berücksichtigt werden. Die Gewichtung, um von einer Anfangsstellung zur Endstellung mit einer n -Achsen-Handhabungskinematik und der jeweiligen maximalen Achsgeschwindigkeit zu gelangen, ergibt sich daher zu [59]:

$$g(a, e) = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} \left\{ \frac{|a_i - e_i|}{mv_i} \right\} \quad (27)$$

mit a_i : Anfangsstellung der Achse i

e_i : Endstellung der Achse i

n : Anzahl der Achsen

mv_i : maximale Achsgeschwindigkeit der Achse i

Um auch die Bewegung von der aktuellen Ausgangslage der Handhabungskinematik zur ersten Vorzugslage zu berücksichtigen, wird vor dem Beginn der Optimierungsrechnung noch die Ausgangslage der Anlagenkinematik mit in die Menge der Vorzugslagen aufgenommen. Damit ist zugleich auch der Startpunkt für die Reihenfolgeberechnung festgelegt.

6.7 Verfahrenswegminimierung innerhalb von Vorzugslagen

Die vorhergehende Optimierungsstufe hat als Ergebnis die optimale Reihenfolge der Vorzugslagen berechnet. Als letzter Schritt ist daher noch die Bearbeitung der Laserbahnen innerhalb der Vorzugslagen zu planen. Ausgangspunkt der Planung sind die Vorgabe einer räumlichen Position und der Orientierung des Werkstücks relativ zum Scansystem, definiert durch die jeweilige Vorzugslage (Bild 33). Die Aufgabe der lokalen Bearbeitungsplanung besteht nun darin, die Reihenfolge der Laserbahnen in einer Vorzugslage so festzulegen, daß die Bearbeitung, im Sinne einer Minimierung der Bearbeitungsdauer, optimal vorgenommen wird. Da durch die vorigen Optimierungsphasen die Erfüllung der Randbedingungen sichergestellt wurde, bedeutet dies für die lokale Bearbeitungsplanung, daß keine erneuten Randbedingungstests mehr durchgeführt werden müssen.

Um die Bearbeitungsdauer für jede Vorzugslage zu minimieren, ist in der Vorzugslage die Reihenfolge der Laserbahnen und die Verfahrensbewegungen von einem Endpunkt einer Laserbahn zum Startpunkt der nächsten Laserbahn so zu bestimmen, daß insgesamt ein möglichst kurzer Gesamtverfahrensweg entsteht. Daher handelt es sich hier ebenfalls um ein TSP-Problem. Für die Lösung des vorliegenden Problems können demnach die gleichen Optimierungsverfahren wie im vorigen Abschnitt verwendet werden. Ein Unterschied besteht allerdings darin, daß der Start- und Endpunkt bei nicht-geschlossenen Laserbahnen verschieden ist. Das Problem bleibt aber NP-vollständig, da jede Laserbahn wiederum als einzelnes Element aufgefaßt werden kann.

Für das TSP-Problem stellen die Laserbahnen mit unterschiedlichem Start- und Endpunkt eine Teillösung dar, die in den bisher berechneten Pfad aufgenommen werden muß (*subtour patching*). Dieser Sachverhalt ist von den Optimierungsverfahren zu berücksichtigen. Um eine erste Lösung zu erzeugen, können die konstruktiven Heuristiken verwendet werden. Sie berücksichtigen jetzt jedoch jeweils den Start- und Endpunkt, wobei der Algorithmus entscheiden kann, welchen von beiden Punkten er als seinen Nachfolger wählt. Bei den

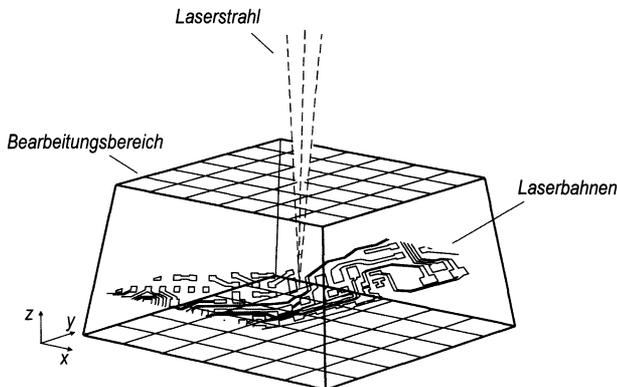


Bild 33: Verfahrenwege innerhalb einer Vorzugslage

Heuristiken nach dem Einfügeverfahren werden Laserbahnen als unteilbare Elemente betrachtet, da ansonsten eine Laserbahn in eine andere eingefügt werden könnte. Dies gilt auch für die Verbesserungsverfahren nach dem Austauschprinzip. Nachdem eine erste Lösung erzeugt wurde, können nur ganze Laserbahnen verschoben werden, um eine Lösungsverbesserung zu erzielen.

Nach dem Optimierungsvorgang ist ein wegminimaler Pfad berechnet worden, ausgehend von dem Startpunkt der ersten Laserbahn bis zum Endpunkt der letzten Laserbahn. Die Transferbahnen zwischen den Laserbahnen sind diejenigen Verbindungen, die in keiner Laserbahn enthalten sind. Die so ermittelten Informationen werden in dieser Form in das Bearbeitungsmodell übernommen und die nächste Vorzugslage in gleicher Form berechnet. Ist dieser Vorgang für alle Vorzugslagen durchgeführt, ist im Bearbeitungsmodell der gesamte Bearbeitungsvorgang für das Werkstück enthalten. Diese Informationen können nun dazu verwendet werden den Bearbeitungsvorgang am Bildschirm zu simulieren oder das steuerungsabhängige Anwenderprogramm für die jeweilige Laseranlage zu erzeugen.

6.8 Programmgenerierung

Damit die Bearbeitung an der Anlage erfolgen kann, ist ein Anwenderprogramm zu erstellen, das von der Anlagensteuerung interpretiert und in Bewegungs- und Schaltaktionen umgesetzt wird. Trotz der hohen Standardisierung der Steuerungen und des NC-Codes unterscheiden sich die Steuerungen für die Laseranlagen von Hersteller zu Hersteller erheblich. Dies gilt für die Syntax der Anwenderprogramme und für die Arbeitsweise der Steuerung. Insofern sind die Anwenderprogramme für jeden Steuerungstyp in unterschiedlicher Form zu erstellen.

Für diese Aufgabe wurden verschiedene Postprozessoren entwickelt, die jeweils das Anwenderprogramm für eine spezifische Anlagensteuerung erstellen. Jeder Postprozessor greift hierfür auf die im Bearbeitungsmodell steuerungsunabhängigen Informationen der Laserbahnen und Laserbahnstützpunkte zurück. Das Anwenderprogramm wird generiert, indem nacheinander, ausgehend vom Startpunkt in der ersten Vorzugslage bis zum Endpunkt in der letzten Vorzugslage, die in den Laserbahnstützpunkten enthaltenen Informationen ausgelesen und in eine oder mehrere NC-Programmzeilen umgesetzt werden. Die Achsstellungen werden als Verfahrenweisungen – getrennt für die Achsen des Scansystems und die des Handhabungssystems – ausgegeben. Die in den Laserbahnstützpunkten enthaltenen technologischen Parameter werden zu Schaltanweisungen umgesetzt. Das so generierte Programm kann anschließend an die Anlage übertragen und dort ausgeführt werden.

7 Realisierung des Planungssystems

Die in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten Konzepte wurden im Rahmen eines Planungssystems für die 3D-Lasermikrobearbeitung implementiert [97-99]. Im folgenden werden zunächst der Aufbau und die Integration der Methoden und Modelle in ein Gesamtsystem dargestellt. Anschließend wird die Leistungsfähigkeit des Systems verifiziert. Hierzu werden die entwickelten Methoden anhand einer Bearbeitungsaufgabe getestet und die Effektivität des Systems im praktischen Einsatz aufgezeigt.

7.1 Systemaufbau und –integration

Für die Realisierung des Planungssystems wurden die dargestellten Methoden und Datenmodelle entsprechend der im Abschnitt 4.3 beschriebenen Vorgehensweise in Form von Modulen implementiert und zu einem eigenständigen Planungssystem zusammengefaßt. Als Rechnerplattform stand ein PC mit Windows NT zur Verfügung. Die Implementierung erfolgte in der Programmiersprache C++.

Parallel zum Planungssystem wird ein Simulationssystem ausgeführt, daß mit dem Planungssystem zu einem Gesamtsystem integriert ist. Für die Integration stellt das Simulationssystem dem Planungssystem eine Schnittstelle mit Funktionsaufrufen (*API, application procedural interface*) zur Verfügung. Die Kommunikation zwischen beiden Systemen erfolgt nach dem Client/Server-Prinzip über Fernaufrufe (*RPC, remote procedure calls*), mit dem Simulationssystem als Server und dem Planungssystem als Client. Das Simulationssystem übernimmt innerhalb des Gesamtsystems die Aufgabe der graphisch-dynamischen Visualisierung sowie die der Kollisionsprüfung. Darüber hinaus werden vom Simulationssystem auch elementare Funktionen für die Erstellung und Manipulation von geometrischen Objekten zur Verfügung gestellt.

Zur Bedienung des Gesamtsystems verfügen beide Systeme jeweils über eine eigene graphische Benutzeroberfläche. Die Darstellung der aktuellen Bearbeitungsaufgabe erfolgt in dem Graphikfenster des Simulationssystems. Einen zweiten Bereich stellt die Benutzeroberfläche des Planungssystems dar. Die Planung des Bearbeitungsvorganges erfolgt durch die darin enthaltenen Menüs und Benutzerdialoge, die die Funktionalitäten der Planungsmodule zur Verfügung stellen und in denen auch alle für die Bearbeitungsplanung notwendigen Informationen angezeigt werden.

7.2 Planungsbeispiel

Der Ablauf einer Fertigungsaufgabe sowie die Bedienung des Planungssystems aus der Sicht des Anwenders soll im folgenden anhand eines Anwendungsfalls aufgezeigt werden. Das Planungssystem verwaltet jede Fertigung eines Werkstücks als eine sogenannte Bearbeitungsaufgabe. Unter einer Bearbeitungsaufgabe werden vom System alle diejenigen Informationen zusammengefaßt und gespeichert, die notwendig sind, um die Bearbeitungsaufgabe nach einer Unterbrechung an gleicher Stelle weiterführen zu können. Dazu zählen etwa Informationen über das Werkstück, die aktuelle Anlagenkonfiguration mit den Prozessparametern oder die bisher vom Bediener vollzogenen Änderungen.

Die Planung einer Fertigungsaufgabe beginnt im System daher zunächst mit der Erstellung einer neuen Bearbeitungsaufgabe. Anschließend wird das zu bearbeitende Werkstück ausgewählt und in das System importiert. Dabei können die Bearbeitungskonturen bereits im CAD-Modell des Werkstücks enthalten sein oder über eine zusätzliche Schnittstelle separat in das Planungssystem eingelesen werden. Die Bearbeitungskonturen werden zusammen mit dem Werkstück im Graphikfenster des Simulationssystems dargestellt (Bild 35).

Im nächsten Schritt ist die entsprechende Laseranlage aus einer Anlagendatenbank auszuwählen, mit der die Werkstückbearbeitung durchgeführt werden soll (Bild 36). Dabei stehen mehrere Laseranlagen zur Auswahl, die sich teilweise nur in ihrer jeweiligen Anlagenkonfiguration unterscheiden. Nach der Benutzerauswahl werden die Anlagenparameter aus der Anlagendatenbank von den Planungsmodulen ausgelesen sowie die Anlagengeometrien in das Simulationssystem übertragen und angezeigt.

Nach der Auswahl der Laseranlage müssen die Aufspannposition und -orientierung des Werkstücks im Bearbeitungsraum von der Laseranlage in das Planungssystem übertragen werden. Zur Übernahme der Werkstücklage sind an der Laseranlage mindestens drei linear unabhängige Werkstückpositionen anzufahren und in das Planungssystem zu übernehmen. Mit diesen Werten kann nun eine eindeutige Transformation berechnet werden, die das

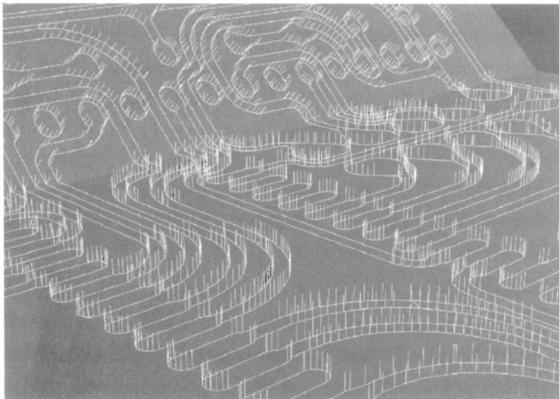


Bild 35: Graphische Darstellung der Laserbahnen im Simulationssystem



Bild 36: Benutzerdialog des Planungssystems zur Auswahl der Laseranlage

Werkstück im Planungssystem aus der aktuellen Lage in die Aufspann- anlage an der Anlage überführt.

Vor der Durchführung der Bearbeitungsplanung besteht für den Bediener die Möglichkeit, interaktiv Änderungen an der Fertigungsaufgabe vornehmen zu können. Zum einen können Modifikationen an den Bearbeitungskonturen und berechneten Laserbahnen vorgenommen werden, was für die Aufbereitung der Fertigungsaufgabe eine wichtige Eingriffsmöglichkeit darstellt. So können vom Bediener interaktiv neue Bearbeitungskonturen hinzugefügt sowie vorhandene Bearbeitungskonturen bzw. Laserbahnen modifiziert werden, indem ganze Abschnitte oder nur einzelne Stützpunkte verschoben, gelöscht oder um neue Stützpunkte ergänzt werden.

Zum anderen können die von den Planungs- algorithmen zu berücksichtigenden globalen Technologie- und Planungsparameter festgelegt werden. Hierzu zählen beispielsweise der maximal erlaubte Einfallswinkel des Laserstrahls auf die Werkstückoberfläche oder etwa die Vorgabe des maximalen Bearbeitungsbereichs des Scansystems. Weiterhin können für die lokale technologische Aufbereitung die aus den Bearbeitungskonturen berechneten Laserbahnen vom Bediener mit Prozessparametern attribuiert werden. So sind etwa über Attribute den einzelnen Laserbahnen oder Laserbahnabschnitten räumlich begrenzt geltende Geschwindigkeitswerte und Laserleistungen festlegbar.

Nachdem der Bediener die Änderungen vorgenommen hat, wird im nächsten Schritt die eigentliche Bearbeitungsplanung durchgeführt. Als Anwendungsbeispiel wurde ein dreidimensionales Werkstück mit Bearbeitungskonturen mit einer Gesamtlänge von 740 mm gewählt. Das Werkstück ist durch viele, stark kollisionsbehaftete Bearbeitungsbereiche charakterisiert und ermöglicht insofern einen intensiven Test aller Planungsstufen (Bild 37). Für die Bearbeitung wurde ein Scansystem mit 3D-Fokuslagensteuerung ausgewählt und der

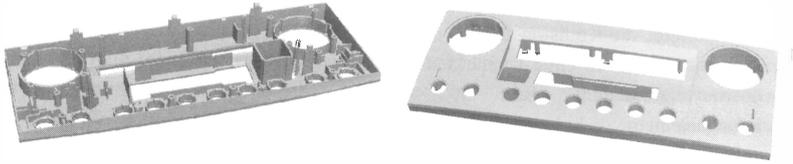


Bild 37: Werkstück für die Bearbeitungsplanung

maximal zulässige Einfallswinkel zwischen Laserstrahl und Werkstückoberfläche mit -15° bis $+15^\circ$ vorgegeben. Als Planungsparameter für die Suchtiefe und -breite zur Vorzugslagenminimierung wurden geringe Werte gewählt, da aufgrund der Kollisionsproblematik bereits absehbar ist, daß die Kollisionsrechnungen einen erheblichen Anteil der Rechenzeit ausmachen werden und die Laufzeit bei höheren Werten zu stark anwachsen würde.

Der Verlauf der ersten beiden Optimierungsstufen für die Vorzugslagenminimierung ist in Bild 38 anhand der jeweils besten gefundenen Lösung je Berechnungsschritt dargestellt. Das beste Optimierungsergebnis mit dem Ergebniswert 12 wurde im Berechnungsschritt 127 erzielt. Eine genauere Betrachtung zeigt, daß bereits ab Berechnungsschritt 110 Lösungen mit einem guten Ergebniswert vorliegen. Ein weiteres Iterieren über den Berechnungsschritt 150 hinaus führte zu keiner weiteren Lösungsverbesserung, da immer weniger Vorzugslagen zur Terminierung zur Verfügung stehen, d.h. der Freiheitsgrad immer geringer wird und die untergeordnete Optimierungsheuristik es dadurch nicht mehr erreicht, die vorhandenen Vorzugslagen weiter zusammenfassen. Bild 39 zeigt die jeweils besten Lösungen nach 50 und 100 Berechnungsschritten sowie das Endergebnis der Vorzugslagenminimierung nach 150 Berechnungsschritten.

Das langsame Konvergenzverhalten bei der Vorzugslagenminimierung stellt einen, für eine stark kollisionsbehaftete Bearbeitungsaufgabe, typischen Optimierungsverlauf dar und ist im wesentlichen auf zwei Ursachen zurückzuführen: Neue Vorzugslagen werden verstärkt in

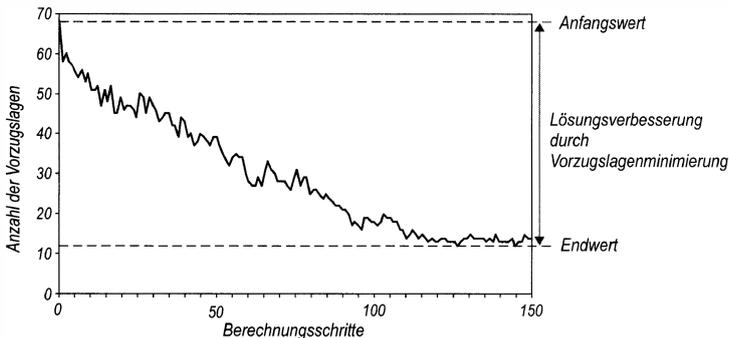


Bild 38: Verlauf der Vorzugslagenminimierung

gleichzeitig kollisionsbehafteten und gekrümmten Bereichen erzeugt, da hierbei zwei Randbedingungen, die Kollisionsfreiheit und der maximale Einfallswinkel gleichzeitig erfüllt sein müssen, und dies zu einer verstärkten Generierung von Vorzugslagen führt. Dies ist im vergrößerten Ausschnitt (Bild 39, oben) verdeutlicht, wo Werkstück- bzw. Versteifungselemente dicht beieinander liegen und die Kollisionsausweichstrategie über nicht mehr so viele Freiheitsgrade verfügt, da sich gleichzeitig in diesem Bereich ein Krümmungsübergang befindet, der die Situation noch verschärft. Insbesondere bei einem Krümmungswechsel mit einem Winkelunterschied größer als der erlaubte Einfallswinkel werden vermehrt Vorzugslagen erzeugt.

Für die anschließenden Optimierungsschritte der Verfahrenswegsminimierung zwischen Vorzugslagen und der Verfahrenswegsminimierung innerhalb von Vorzugslagen wurden im Planungssystem ein enumerierendes Branch&Bound-Verfahren, die Einfügeverfahren Nearest Neighbour, Farthest Insertion und Cheapest Insertion sowie ein lösungsverbesserndes k-opt-Austauschverfahren implementiert. Bei dem Austauschverfahren handelt es sich um ein 3-opt-Verfahren, das eine 3-optimale Lösung des Optimierungsproblems garantiert. Die durchschnittlichen Rechenzeiten für Werte mit $k > 3$ sind wenig praxistauglich [100] und ein einfaches Heraussetzen führt zu einem erheblich höheren Rechenzeitbedarf.

Die hierbei erzielten Ergebnisse zeigten erhebliche Unterschiede, je nach Anzahl der Vorzugslagen bzw. Laserbahnen. Einen guten Kompromiß zwischen Laufzeitverhalten und die Lösungsqualität stellte das Einfügeverfahren Farthest-Insert dar. Interessanterweise wurden mit dem Farthest Insert-Verfahren innerhalb aller Einfügeverfahren mit die besten Resultate erzielt. Die erzielten Ergebnisse wichen in der Regel nur 5 % bis 10 % vom globalen Optimum ab. Das nachgeschaltete 3-opt-Verfahren konnte die Lösung daher nur noch geringfügig verbessern.

Nach der Bearbeitungsplanung können die berechneten Verfahrensbewegungen im Rahmen einer Simulation graphisch auf dem Bildschirm dargestellt werden, und kann sich der Bediener einen Überblick über den gesamten Fertigungsablauf verschaffen. Für die Ablaufkontrolle stehen dem Bediener zahlreiche Funktionen zur Verfügung. So besteht die Möglichkeit, die Darstellungsgeschwindigkeit beliebig zu verändern, so daß eine Beschleunigung der Simulation an unkritischen Bearbeitungsbereichen vorgenommen oder komplizierte kleinräumige Bearbeitungen verlangsamt dargestellt werden können. Darüber hinaus ist die Bearbeitung in Einzelschritten ausführbar oder ein Sprung zur Bearbeitung der nächsten Laserbahn möglich. Sollten noch Modifikationen notwendig sein, so können diese vom Bediener durchgeführt und eine erneute Bearbeitungsplanung angestoßen werden. Zudem ist es möglich, eine bereits gefundene Lösung als Startmenge einer neuen Bearbeitungsplanung – mit geänderten Planungsparametern – heranzuziehen. Nach der Bearbeitungsplanung kann zu jedem Zeitpunkt mit den Benutzerdialogen des Planungssystems das steuerungsabhängige Anwenderprogramm generiert werden. Der Bediener wählt hierzu den entsprechenden Post-Prozessor aus einer Liste aus und nimmt bei Bedarf Einstellungen für den Generierungsvorgang vor. Das generierte Programm wird abschließend zur Anlage übertragen und dort ausgeführt.

7.2 Planungsbeispiel

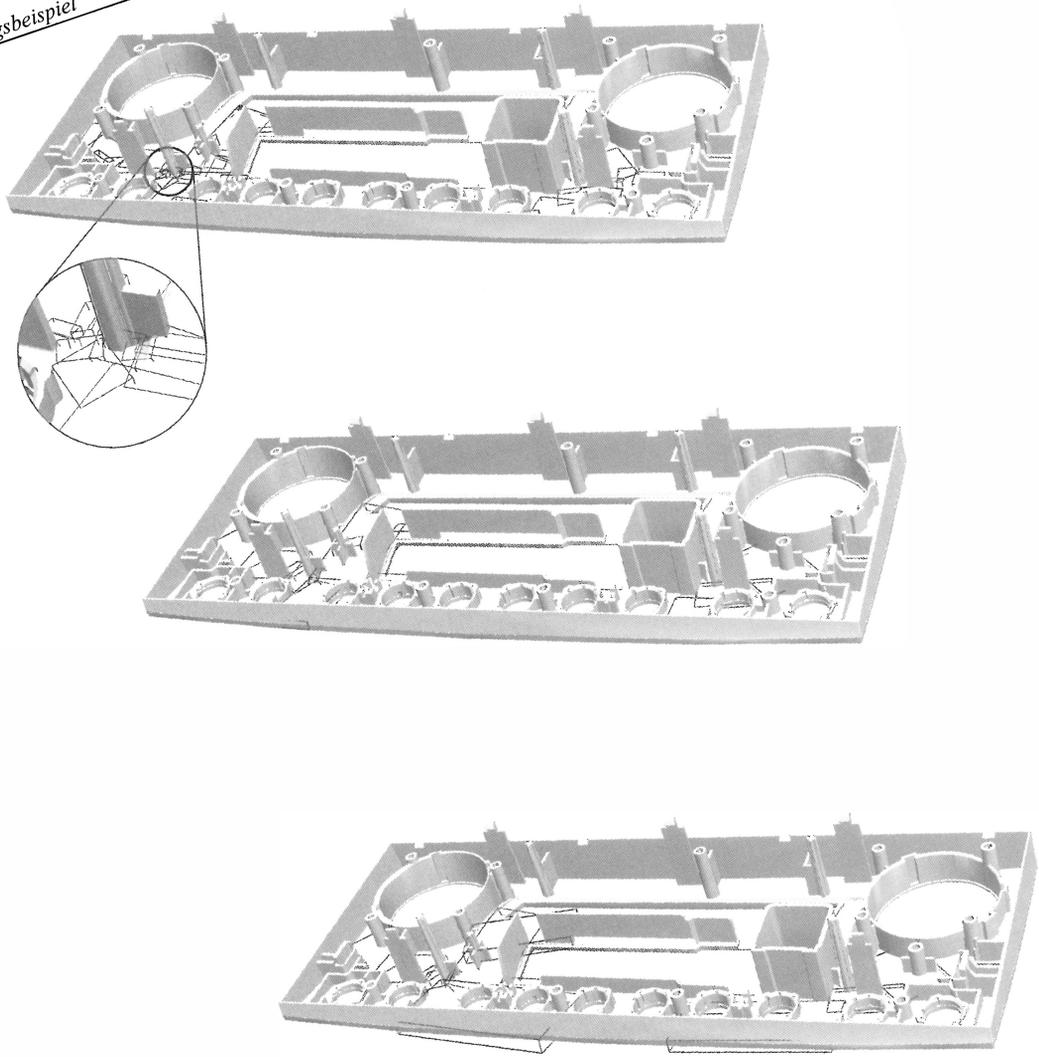


Bild 39: Optimale Lösungen während der Vorzugslagenminimierung nach 50, 100 und 150 Berechnungsschritten

Insgesamt steht mit dem realisierten Planungssystem ein leistungsfähiges Werkzeug für die Bearbeitungsplanung im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung zur Verfügung, mit dem die Miniaturisierungs- und Produktivitätspotentiale der 3D-Lasermikrobearbeitung genutzt werden können. Die durch das Planungssystem erzielten technischen und wirtschaftlichen Vorteile sind:

- Durch eine schnelle und automatisierte Erstellung der Anwenderprogramme werden kurze Programmierzeiten erreicht. Die Aufgabe des Bediener reduziert sich auf die Spezifikation der Fertigungsaufgabe. Damit ist eine einfache Programmerstellung auch für komplexe Werkstücke möglich.
- Planungsalgorithmen optimieren das Bewegungsverhalten der redundanten und multiplen Anlagenkinematiken und generieren effiziente Anwenderprogramme.
- Zahlreiche Eingriffsmöglichkeiten unterstützen den Bediener bei der Aufbereitung der Bearbeitungsaufgabe. Das einfache Modifizieren von Bearbeitungskonturen stellt insbesondere für die Prototypen- und Kleinserienfertigung ein wichtiges Hilfsmittel dar.
- Die Ablaufsimulation des Bearbeitungsvorgangs ermöglicht einen benutzertransparenten Einblick in den 3D-Lasermikrobearbeitungsprozeß.
- Durch die Übernahme der CAD-Werkstückdaten aus dem Bereich der Konstruktion in das Planungssystem entsteht eine geschlossene Prozeßkette. Im Hinblick auf das Rapid-Prototyping können die Anwenderprogramme bereits zu einem Zeitpunkt erstellt werden, an dem noch kein reales Werkstück vorliegt.

8 Zusammenfassung

Die 3D-Lasermikrobearbeitung zeichnet sich gegenüber anderen Bearbeitungsverfahren aus dem Bereich der Mikrobearbeitung durch ihr hohes fertigungstechnisches Potential aus, das es zu nutzen gilt. Die Vorzüge dieser Technologie können jedoch nur durch eine rechnerbasierte Planung und Erstellung der Anlagenprogramme genutzt werden. Dies liegt vor allem an den hohen Genauigkeitsanforderungen sowie an der nur gering vorhandenen Prozeßeinsicht des Bedieners aufgrund kleinster Bauteilgrößen und räumlich komplexer Bearbeitungskonturen. Zudem verfügen die Anlagen für die 3D-Lasermikrobearbeitung über eine redundante und multiple Kinematik, bestehend aus einer Handhabungskinematik und einem Scansystem, die aufgrund ihrer Freiheitsgrade eine andere Form der Anlagenprogrammierung so gut wie ausschließt. Eine Lösung bieten erst Programmiersysteme, die in Verbindung mit rechnerinternen Datenmodellen und Planungsmethoden die Anlagenprogramme automatisch erstellen und den Mikro-Bearbeitungsvorgang visualisieren können. Allerdings stehen derartige Systeme für den Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung nicht zur Verfügung.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher Methoden zur Bearbeitungsplanung für die 3D-Lasermikrobearbeitung entwickelt, die die relevanten anlagen- und aufgabenspezifischen Randbedingungen berücksichtigen und die Effizienz und Zuverlässigkeit der erstellten Anwenderprogramme durch intelligente Bearbeitungsplanungs- und Optimierungsfunktionen steigern. Hierfür wurden zunächst anhand einer Analyse der Bearbeitungsaufgabe und der Randbedingungen die Anforderungen an die Planungsmethoden definiert und im Hinblick auf einen Einsatz der Methoden als integraler Bestandteil eines Planungssystems ein flexibles Integrationskonzept entwickelt.

Als Grundlage der rechnerinternen Darstellung sind verschiedene Datenmodelle erarbeitet worden, die die Planungsaufgabe vollständig abdecken, von der geometrischen Beschreibung des Werkstücks bis zur Generierung der Anlagenprogramme. Bei der Erstellung des Anlagenmodells wurde im Zusammenhang mit der kinematischen Modellbildung insbesondere auch das Problem der Rücktransformation für die Handhabungskinematik und das Scansystem gelöst. Die Modellierung des Scansystems macht dabei auch eine Betrachtung des Laserstrahlverlaufs erforderlich. Aufgrund des großen Arbeitsabstands zwischen dem Scansystem und dem Werkstück können ungewollte Abschattungen auftreten, die als Kollisionen erkannt werden müssen. Daher wurde der Laserstrahlverlauf für verschiedene Scansysteme hergeleitet.

Der effiziente Einsatz der Laseranlagen durch die Erstellung optimierter Anlagenprogramme hat eine wesentliche Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Die Bearbeitungsplanung hat daher den Bearbeitungsvorgang des Werkstücks zu optimieren und die Bearbeitungsvorteile der redundanten und multiplen Kinematik zu nutzen, indem günstige und möglichst wenige Bearbeitungs- bzw. Vorzugslagen für das Werkstück

berechnet werden. Aufgrund der komplexen Problemstellung wurde die Bearbeitungsplanung daher als mehrstufige Hierarchie von Berechnungsverfahren realisiert. Dieser Ansatz führte zu einer klaren Aufgabentrennung und damit zu einer Reduzierung der Gesamtproblematik. Zusätzlich konnten hierdurch die verwendeten Algorithmen unabhängig voneinander entwickelt und besser auf ihre jeweilige Aufgabenstellung spezialisiert und optimiert werden.

In der ersten Hierarchiestufe werden die Laserbahnen aus den Bearbeitungskonturen des Werkstücks abgeleitet sowie eine obere und untere Schranke für die Anzahl der Vorzugslagen bestimmt. Eine obere und untere Schranke konnte mit Hilfe des Einbettungsprinzips ermittelt werden, das es zudem auch noch ermöglicht, eine günstige Startmenge für die Vorzugslagenberechnung zu bestimmen. Die zweite Hierarchiestufe hat das Ziel, die Anzahl an Vorzugslagen zu minimieren. Hierfür wurde ein iteratives Optimierungsverfahren entwickelt, bei dem ein untergeordneter Optimierungsalgorithmus gültige Lösungsmengen unter Berücksichtigung der Randbedingungen erzeugt, die von einem übergeordneten Optimierungsalgorithmus anschließend hinsichtlich ihrer Lösungsgüte bewertet werden. Mit dem gewählten Ansatz wurde eine leistungsfähige Kombination zweier, sich ergänzender Optimierungsalgorithmen realisiert. Das Optimierungsverfahren ist zudem in der Lage, lokale Minima wieder verlassen zu können, und es kann durch eine Parametrisierung hinsichtlich der Suchbreite und -tiefe vom Benutzer gesteuert werden. Am Ende der Vorzugslagenberechnung hat die dritte Hierarchiestufe die Aufgabe, den minimalen Verfahrensweg zwischen den berechneten Vorzugslagen zu ermitteln. Hierzu wurden die Äquivalenz des Problems mit einem klassischen Optimierungsproblem aufgezeigt und verschiedene Lösungsverfahren dargestellt. Die letzte Hierarchiestufe hat die Aufgabe, die Bearbeitungsplanung innerhalb einer Vorzugslage zu optimieren. Die hierfür verwendeten Algorithmen ermitteln eine optimale Bearbeitungsreihenfolge der Laserbahnen und die Transferbewegungen im Sinne einer Wegminimierung.

Die im Rahmen eines Planungssystems zusammengefaßten Methoden wurden abschließend anhand eines Anwendungsbeispiels verifiziert. Hierbei konnte die Leistungsfähigkeit der entwickelten Konzepte im praktischen Einsatz demonstriert werden. Durch die Übernahme der Werkstückkonstruktionsdaten wurden sowohl eine Unterstützung für die Prototypen- und Kleinserienfertigung als auch die Integration der 3D-Lasermikrobearbeitung in die Prozeßkette erreicht. Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß mit dem entwickelten Planungssystem nun ein leistungsfähiges Werkzeug für die Anlagenprogrammierung im Bereich der 3D-Lasermikrobearbeitung zur Verfügung steht.

Literaturverzeichnis

- [1] Thümmler, T.: Mit Hyperintegration ins 21. Jahrhundert. In: Elektronik 1 (1993), Franzis, München
- [2] Freund, B.: Neue Herausforderungen an die Produktion durch Packungsdichte und Funktionsintegration. In: Tagungsband zur Fachtagung Productronica, Münchener Messe und Ausstellungsgesellschaft mbH, München, 1991
- [3] Frank, M.: Photopolymere im Aufwind. In: productronic 6 (1998), 124
- [4] Gillner, A.: Laseranwendungen in Sensorik und Mikrosystemtechnik. In: Laser Magazin 3 (1995), 15-19
- [5] Notenboom, G.; Hoving, W.: Laser micro-processing in the electronics industry. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000, Bamberg: Meisenbach, 1995, 39-48
- [6] Hamann, Chr.: Laseranwendungen in der Elektrotechnik – Einsatz zum Fügen. In: Aachener Kolloquium für Lasertechnik'98. Aachen, 1998
- [7] Knoff, M.: Laser in der Feinwerktechnik – gepulst oder cw?. In: VDI-Berichte Nr. 1031 (1993), 63-79.
- [8] Schneider, R.: Laseranwendungen in der Automobilelektronik. In: Aachener Kolloquium für Lasertechnik'98. Aachen, 1998
- [9] Hoving, W.: Laser applications in micro technology. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Bamberg: Meisenbach, 1997, 69-80.
- [10] Mayer, A.: Stand und Entwicklung des Lasermarktes - starkes Wachstum für die Mikrobearbeitung. In: Geiger, M.; Fleckenstein, M.: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik: Tagungsband des 4. Erlanger Seminars LEF 2001, Erlangen, 7.-8. März 2001, Bamberg: Meisenbach, 2001
- [11] Klein, R.J.: Weichlöten in der Elektronik, 2. Auflage. Saulgau/Württ.: Eugen G. Leuze, 1991
- [12] Hänsch, D.; Pütz, H.; Treusch, H.-G.: Laser statt Kleber. In: Laser-Praxis, 10 (1997), 22-24
- [13] Dorn, L.; Grutzeck, H.; Jafari, S: Stand und Entwicklungstendenzen des Laser-Mikroschweißens. In: Elektronik, Produktion & Prüftechnik (1990) 3, 18-23

- [14] Tönshoff, H.K., Schumacher, J.: Festkörperlaser in der Fertigungstechnik. In: Laser – Von der Wissenschaft zur Anwendung, Strahltechnik Bd. 10. Bremen: BIAS, 1997
- [15] Glasmacher, M.; Pucher, H.-J.: Laser Beam Micro Welding as a New Interconnection Technique. In: Microelectronics International 38 (1995)
- [16] Kickelhain, J.: Mikroschneiden von SMD-Schablonen für den Lotpastendruck. In: Geiger, M., Otto, A.: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik: Tagungsband des 3. Erlanger Seminars LEF 2000, Erlangen, 8.-9. März 2000, Bamberg: Meisenbach, 2000, 124-136
- [17] Semrau, H.: Technologie der Laser-Materialbearbeitung und Einsatzmöglichkeiten für den Laser zum Schneiden und Bohren in der industriellen Fertigung. In: Tönshoff, H.K.; Semrau, H. (Hrsg.): Anwenderseminar Laserstrahlschneiden und -bohren. Hannover, Universität, 1987
- [18] Koch, J.; Wolf, M.; Sepold, G.: Mikrobohrungen in Dünnschicht – hergestellt mit dem Laser. In: Wt Werkstattstechnik 89 (1999) 11/12, 492-494
- [19] Schaeffer, R. D.: An Overview of Lasers for MicroVia Drilling. In: Future Circuits, 3 (1998) 1
- [20] Treusch, H. G.: Bohren mit Laserstrahlung, Teil 1. In: Schweizer Maschinenmarkt 84 (1984) 25, 28-30
- [21] Treusch, H. G.; Hölting, B.; Knoff, M.: Bohren mit gepulsten Nd:YAG-Lasersystemen. In: Laser und Optoelektronik 4 (1985), 397-408
- [22] Noor, Y.; Tam, S.; Lim, L.; Jana, S.: A review of the Nd:YAG laser marking of plastics and ceramic IC packages. In: Journal of Materials Proceeding Technology 42 (1994), 95-133
- [23] von Alvensleben; Momma, C.; Wais, J.: Mikrobeschriftung mit Laserstrahlung. In: Laser und Optoelektronik 29 (2) 1997, 52-58
- [24] Belforte, D.A.: Industrial Laser Technology. In: AMP Journal of Technology, Vol. 4, 06/95 (1995), 65-76
- [25] Eßer, G.; Dietel, C.; Geisel, M.; Pursche, L.; Roth, S.: Laser imaging of three-dimensional molded interconnect devices. In: Geiger, M; Vollertsen, F. (Hrsg.): Proceedings of Laser Assisted Net Shape Engineering LANE'97, Bamberg: Meisenbach, 1997, 795-798
- [26] N. N.: DIN EN ISO 11145, Optik und optische Instrumente – Laser und Laseranlagen – Begriffe und Formelzeichen, 1994
- [27] Schubert, S.: Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken. Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1998

- [28] N. N.: Herzstück der Laserbeschrifter – Strahlablenkung mit Galvanometerscannern. In: Laser 4 (1996), 22-23
- [29] Münch, H.: Bewegungssynthese zur Steuerung redundanter und kooperierender Kinematiken. München; Wien: Hanser, 1991
- [30] Duelen, G.; Kirchhoff, U.; Held, J.; Münch, H.: Automatische Bewegungssynthese für bahnbezogene kooperierende Industrieroboter. In: Robotersysteme (1987) Nr. 3, 107-113
- [31] Jimenez, J., et. al.: RISC-Based Architecture for Multiple Robot Systems. In: Micorprocessors and Microsystems, 16 (1992) 4, 177-186
- [32] Osterwinter, M.: Steuerungsorientierte Robotersimulation. In: Ameling, W., Weck, M. (Hrsg.): Fortschritte der Robotik, Bd. 10. Wiesbaden: Vieweg, 1992
- [33] Spur, G.; Auer, B.H.; Sinning, H.: Industrieroboter: Steuerung, Programmierung und Daten von flexiblen Handhabungseinrichtungen. München, Wien: Carl Hanser, 1979
- [34] Warnecke, H.-J.; Schraft, R.D.: Industrieroboter. Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Springer, 1990
- [35] Eßer, G., U. Urmoneit, Ziegenaus, M.: 3-D Fokuslagensteuerung für die Laserstrahlstrukturierung. In: Geiger, M., Otto, A.: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik: Tagungsband des 3. Erlanger Seminars LEF 2000, Erlangen, 8.-9. März 2000, Bamberg: Meisenbach, 2000, 197-212
- [36] Krauß, Franz: Splineverarbeitung in numerischen Steuerungen für das fünffachsiges Fräsen. Berlin: Springer, 1996
- [37] Bechtloff, J.; Boysen, N.: Spline-gestützte Offline-Programmierung von Industrierobotern. Zwf 89 (1994), 7-8
- [38] Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologie für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1995
- [39] Hartmann, U.; Zaderej, V.: Aus 3D-Leiterplatten werden Produkte. In: Feinwerktechnik & Meßtechnik, 11 (1991)
- [40] Eßer, G.; Dietel, C.; Roth, S.; Glasmacher, M.; Hutfless, J.; Kickelhain, J.: Laser assisted techniques for patterning of conductive tracks on Moulded Interconnect Devices. In: Proceedings of the 3rd PanPacific Microelectronics Symposium (Hawaii, Feb. 1998), 225-233
- [41] Heß, P.: Programmierverfahren für Industrieroboter. In: wt-Produktion und Management 84 (1994), 474-478
- [42] Schwarz, H.: Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik. Berlin: Springer, 1994

- [43] Zhang, Y.; Münch, H.: Modellgestützte optimale Bewegungsplanung für Industrieroboter. VDI Berichte, Nr. 1094, 1993, 219-230.
- [44] Herkommer, T.F.; Roth, J.M.; Walter, S.E.: Off-Line-Programmieren – Geschichte und aktueller Stand, rechnerunterstützte Konstruktion und Planung. *ZwF* 86 (1991), 392-396
- [45] Maglica, R.; Martensson, N.: Visual Off-Line Programming of Industrial Robots. Proceedings of the 24th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, 4-6 Nov. 1993, 369-375.
- [46] Kortus, M.; Ward, T.; Wu, M.H.: An Alternative Approach to Off-Line Programming. In: *Industrial Robot*, 4 (1993) 20, 17-20.
- [47] Wloka, D. W.: Grundlagen der Robotersimulation. In: Wloka, D.W. (Hrsg.): *Robotersimulation*, Berlin: Springer, 1991
- [48] Kwok, S. H.: Realisierung eines Simulationssystems mit 3D-Geometriemodellen für die Bohr- und Fräsbearbeitung. München; Wien: Hanser, 1994
- [49] Li, W.: Graphische Simulation und Kollisionsvermeidung von Robotern. In: *Fortschritte der Robotik*, Bd. 15, Wiesbaden: Vieweg, 1992
- [50] Lim, Y. S.: Kollisionskontrolle als Baustein eines modularen graphisch-dynamischen 3D-Simulationssystems für numerisch gesteuerte Mehrschlittendrehmaschinen. München; Wien: Hanser, 1992
- [51] Kayser, K.-H.: Kollisionserkennung in numerischen Steuerungen mit der Distanzfeldmethode. Berlin: Springer, 1989
- [52] Moser, O.: 3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen. Berlin: Springer, 1991
- [53] N. N.: VDI 2863, Blatt 1, IRDATA – Programmierung numerisch gesteuerter Handhabungseinrichtungen – Allgemeiner Aufbau, Satztypen und Übertragung. Berlin: Beuth, 1987
- [54] VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien: 3D-Bearbeiten mit CO₂-Hochleistungslasern. Tagungsband zur Abschlusspräsentation des BMBF-Verbundprojektes, Düsseldorf, 1992
- [55] Sommer, E.: Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen. München, Wien: Carl Hanser, 1992
- [56] Zheng, Y.F.: Kinematik und Dynamik of Two Industrial Robots in Assembly. In: *Proc. Of the IEEE, Int. Conf. On Robotics and Automation*, 1989, 1360-1365
- [57] Peper, S.: Schweißstruktur-orientierte Offline-Programmierung von Lichtbogen-schweißrobotern. Aachen: Shaker, 1998
- [58] Kohlhaas, E.: Offline-Programmierung von Industrierobotern durch Verdichtung digitalisierter Bahndaten. Düsseldorf: VDI, 1998

- [59] Backes, F.: Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung. Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1997
- [60] N. N.: CATIA – Produktbeschreibung. IBM Deutschland GmbH, 1987.
- [61] N. N.: ROBCAD – Systembeschreibung. Tecnomatix Automatisierungssysteme GmbH, Offenbach, 1987.
- [62] Backes, F.: Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen. In: Laser-Praxis, 2 (1999), 31-32
- [63] Geiger, M.; Reinhart, G.; Backes, F.; Bauer, L.: Technology Oriented Off-line Programming for 3D Laser Processing. In: Technical Papers of the North American Manufacturing Research Institution. (SME 1996), 241-246
- [64] Reinisch, H.: Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen. München; Wien: Hanser, 1992
- [65] Schrüfer, N.: Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung. Berlin: Springer, 1992
- [66] Dou, S.: Off-line-Programmierung von Industrierobotern für die konturgebende Fertigung. Düsseldorf: VDI, 1997
- [67] Pritschow, G.; Schmidt, W.: Entwicklung eines simulationsgerechten Geometriemodells für ein grafikunterstütztes Simulationssystem. In: wt Werkstattstechnik 79 (1989), 99-103
- [68] Ahuja, N.; et.al.: Interference Detection and Collision Avoidance among three dimensional Objects. Proceedings of the First Annual National Conference on Artificial Intelligence, Stanford University, August 1980
- [69] Hopcroft, J.E.; Schwartz, J.T.; Sharir, M.: Efficient Detection of Intersections among Spheres. In: The International Journal of Robotics Research, Vol. 2, 4 (1983)
- [70] Eversheim, W.; Schütze, P.; Luszek, G.: Kollisionskontrolle für offline erstellte Industrieroboter-Programme. In: VDI-Z 130 (1988) 1, 63-68
- [71] Braid, I. C.: Designing with Volumes (second edition). Cantab Press, 1974
- [72] Marczinski, G.: Verteilte Modellierung von NC-Planungsdaten: Entwicklung eines Datenmodells für die NC-Verfahrenskette auf Basis von STEP. Aachen: Shaker, 1993
- [73] Liu, J.: Handskizzeingabe von Freiformgeometrien für CAD-Modelle. München; Wien: Hanser, 1995
- [74] Schimonyi, J.: NC-Programmierung für das Werkzeugschleifen. Berlin: Springer, 1991
- [75] Leu, M.C.: Robot Motion Simulation and Planning Based on Solid Modeling. In: Annals of the CIRP, Vol. 37, 1 (1988), 141-144

- [76] Rieseler, H.: *Roboterkinematik – Grundlagen, Invertierung und symbolische Berechnung*. Fortschritte der Robotik, Bd. 16, Wiesbaden: Vieweg, 1992
- [77] Heiß, H.: *Die explizite Lösung der kinematischen Gleichung für eine Klasse von Industrierobotern*. Institut für Informatik TU München, 1985
- [78] Jacobi, A. N.: *Beitrag zur Parametrierung und Integration von Steuerungssimulationsmodellen*. München; Wien: Hanser, 1994
- [79] Klein, Friedrich: *NC-Steuerung für die 5-achsige Fräsbearbeitung auf der Basis von NURBS*. Aachen: Shaker, 1995
- [80] Garey, M.R.; Johnson, D.S.: *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. San Francisco, 1979
- [81] Müller-Merbach, H.: *Optimale Reihenfolgen*. In: *Ökonometrie und Unternehmensforschung*, Bd. 15, Berlin, 1970
- [82] Dantzig, G.; Fulkerson, R.; Johnson, S.: *Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem*. In: *Operations Research*, Vol. 2 (1954), 393-410
- [83] Little, J.D.C.; Murty, K.G.; Sweeney, D.W.; Karel, C.: *An Algorithm for the Traveling Salesman Problem*. In: *Operations Research*, Vol. 11 (1963), 972-989
- [84] Menger, K.: *Botenproblem*. In: Menger, K. (Hrsg.): *Ergebnisse eines mathematischen Kolloquiums*, 2 (1932), 11-12
- [85] Clarke, G.; Wright, J.W.: *Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points*. In: *Operations Research*, Vol. 12 (1964), 568-581
- [86] Sedgewick, R.: *Algorithmen*, 1. Nachdruck. Bonn, München, Reading, 1992
- [87] Aarts, E.H.L.; van Laarhoven, P.J.M.: *Simulated annealing: An introduction*. In: *Statistica Neerlandica*, Vol. 43 (1989) 1, 31-52
- [88] Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P.: *Optimization by Simulated Annealing*. In: *Science* 220 (1983), 671-680
- [89] Rudolph, G.; Schwefel, H.P.: *Evolutionäre Algorithmen – ein robustes Optimierkonzept*. In: *Physikalische Blätter*, 50. Jg. (1994) 3, 236-238
- [90] Metropolis, N.; Rosenbluth, A. W.; Rosenbluth, M. et. al.: *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*. In: *J. Chem. Phys.* 21 (1953), 1087-1092
- [91] Chatterjee, S.; Carrera, C.; Lynch, L.A.: *Genetic algorithms and traveling salesman problems*. In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 93 (1996) 3, 490-510
- [92] Ablay, P.: *Optimieren mit Evolutionsstrategien: Reihenfolgeprobleme, nichtlineare und ganzzahlige Optimierung*. Dissertation, Universität Heidelberg, Heidelberg, 1979
- [93] Fogel, D.B.: *Applying Evolutionary Programming to Select Traveling Salesman Problems*. In: *Cybernetics and Systems*, Vol. 24 (1993) 1, 27-36

-
- [94] Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen. Berlin: Springer, 1999
- [95] Foley, J. D.; van Dam, A.: Fundamentals of Interactive Computer Graphics. Addison-Wesley Publishing Company, 1982
- [96] Lin, S.: Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem. In: Bell System Technical Journal, Vol. 44 (1965), 2245-2269
- [97] Geiger, M.; Pursche, L.; Backes, F.: Macro and Micro – Off-Line Programming of 3D Laser Systems in all Dimensions. In: Uhlmann, E. (Hrsg.): IX. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium – Tagungsband PTK 98, 29. und 30. Oktober 1998, Berlin, 255-261
- [98] Pursche, L.; Roth, S.: Prozeßtechnik und Offline-Programmierung für die Laserstrahldirektstrukturierung von 3-D MIDs. In: Geiger, M.; Otto, A. (Hrsg.): Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik – Tagungsband LEF'99. Bamberg: Meisenbach, 1999, 107-118
- [99] Pursche, L.: Off-line Programming for 3D Laser Micro Processing. In: Hashmi, M. S. J.; Looney, L. (Edtrs): International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, AMPT 1999, 03.-06.08.1999, Dublin, Ireland, 1649-1656
- [100] Reinelt, G.: The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications. In: Computer Science, Vol. 840 (1994), 101-106

Summary

Three-dimensional Laser Micro Processing is distinguished from other micro processing technologies through its high technological potential. This is to be exploited. The advantages of this technology are only accessible through computer aided planning of the manufacturing steps and programming of the NC-code. The reasons for the necessity of computer assistance are the very high demands on accuracy as well as the small size and complex 3D machining paths which limit the visual control of the process by the worker.

During this research methods for the planning of the manufacturing steps and NC-programming in the field of 3D laser micro processing have been developed. Besides reducing the planning time through automatic offline NC-programming these methods increase the flexibility of the manufacture and thus allow a greater workpiece variety.

The first step towards this result was the definition of computer internal data models which cover the planning task completely including the workpiece models and models for the laser beam track in different scanning systems. A major aspect of the research done was the development of planning algorithms that not only the technology but also all task specific limitations into account and increase the efficiency and reliability of the resulting NC-programs through the exploitation of intelligent manufacturing planning and optimisation methods. The resulting concept has been realised in a planning system that enables possibilities of integrating 3D laser micro processing into process chains as well as the support of prototype and small batch manufactures

Lebenslauf

Der Lebenslauf wird nicht veröffentlicht.

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen :
Prozeführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozessdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem
zur Optimierung der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechbiegeteile**
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung
in Feldkommunikationssystemen**
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

- Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D–Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA–Anwendungen über einem STEP–Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt– und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen zur Prozeß– und Programmoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus–Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs– und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meißner

**Kaltmassumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schuberth

**Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**

216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

