Faseroptische Sensoren zur Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Benno Bröcher

aus Olpe

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. (BR) Prof. h.c. (TJ) Tilo Pfeifer Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Reinhart Poprawe M.A.

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Juni 2000

D 82 (Diss. RWTH Aachen)





Fraunhofer Institut Produktionstechnologie

Berichte aus der Produktionstechnik

Benno Bröcher

Faseroptische Sensoren zur Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dipl.-Wirt. Ing. W. Eversheim Prof. Dr.-Ing. F. Klocke Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. W. König Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Prof. h. c. T. Pfeifer Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. M. Weck

> Band 19/2000 Shaker Verlag D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Bröcher, Benno:

Faseroptische Sensoren zur Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik/ Benno Bröcher. Aachen : Shaker, 2000

(Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 2000, 19) Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2000 ISBN 3-8265-7712-4

Copyright Shaker Verlag 2000

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7712-4 ISSN 0943-1756

> Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen Telefon: 02407/9596-0 • Telefax: 02407/9596-9 Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Tilo Pfeifer, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmeßtechnik und Qualitätsmanagement, für die wohlwollende Förderung und Unterstützung meiner Arbeit sowie für die angenehme Zusammenarbeit.

Herrn Prof. Dr. rer.nat. Reinhart Poprawe, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik, danke ich für die Übernahme des Zweitberichtes und die eingehende Durchsicht meiner Dissertationsschrift.

Allen Mitarbeitern des WZL und des Fraunhofer-IPT danke ich für die kollegiale und hilfsbereite Zusammenarbeit in einem freundschaftlichen Arbeitsklima. Dieser Dank gilt im besonderen Maße Bernd Petersen, Gerd Dussler und Manfred Benz. Dr. Stephan Rümenapp danke ich für seine Anregungen und seine Diskussionsbereitschaft während meiner Zeit am WZL.

Für die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich meinen studentischen Hilfskräften Xavier d'Estaing Dountsop Yonta, Klaas-Henning Müller und Thomas Raffelsieper sowie meinen Studien- und Diplomarbeitern Thomas Michael Bohnen, Andreas Netzel, Vincentius Ismail, Georg Roß sowie Axel "Effendi" Büchel meinen Dank aussprechen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die für mich ein großer Rückhalt ist. Meine Töchter Hannah und Emma sowie unser Hund Joshua haben für die nötige Abwechslung und Zerstreuung gesorgt, während meine Frau Karin mir stets den Rücken frei gehalten hat.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern für die Unterstützung danken, die mir diesen Weg überhaupt ermöglicht hat.

Aachen, im Juli 2000

Benno Bröcher

1
echnik 3
ik 3
5
rosystemtechnik 6
rosystemtechnik 9
9
chung 15
16
. 19
oren 21
tleitung 21
24
26
26 26
26 26 27
26 26 27 28
26 26 27 28 28 28
26 26 27 28 28 28 29
26 26 27 28 28 28 29 30
26 26 27 28 28 28 29 30 29 30 29 30
26 26 27 28 28 28 29 30 ren 30 ren 31

6	Fase	roptisches Multisensorsystem	37
	6.1 Ein	satzmöglichkeiten	37
	6.1.1	Einzelne faseroptische Sensoren	38
	6.1.2	Linienförmig angeordnete Sensorik	38
	6.1.3	Flächig angeordnete Sensorik	39
	6.2 Ein	satzmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik	44
	6.3 Koi	nzept eines multifunktionalen Bildleiters	45
	6.4 Koi	mponenten des multifunktionalen Bildleiters	47
	6.4.1	Kombinationsoptik	47
	6.4.2	Neugestalteter Bildleiter	50
	6.4.3	Bildaufnahme	53
	6.4.3	3.1 Fotodiode	53
	6.4.3	3.2 CCD-Kamera	54
	6.4.3	3.3 CMOS-Kamera	57
	6.4.3	8.4 Vergleich von CCD- und CMOS-Kamera	58
	6.4.4	Auswerte- und Anzeigeeinheit	60
7	Kalił	orierung inkohärenter Bildleiter	61
	7.1 Sta	nd der Technik	61
	7.1.1	Versuchsaufbau	62
	7.1.2	Ablauf der Kalibrierung	63
	7.1.3	Defizite des mechanischen Kalibrierverfahrens	67
	7.1.3	3.1 Defizite des Versuchsaufbaus	67
	7.1.3	3.2 Defizite des Verfahrens	68
	7.2 Op	toelektronisches Kalibrierverfahren	70
	7.2.1	Versuchsaufbau	70
	7.2.2	Ablauf der optoelektronischen Kalibrierung	71
	7.2.3	Unterschiede gegenüber dem Stand der Technik	75
	7.2.4	Optimierung des optoelektronischen Kalibrierverfahrens	77
	7.3 Erg	ebnisse des optoelektronischen Kalibrierverfahrens	80
	7.4 Ada	aption an den multifunktionalen Bildleiter	82

	7.4.1	Adaption des Kalibrierverfahrens	82
	7.4.2	Kopplung von Faserbündel und Detektor	87
	7.4.3	Darstellung	88
7	.5 Faz	zit	90
8	Anw	endung bei der Mikromontage	91
8	.1 Into	egration von Endoskopen in Handhabungswerkzeuge	91
	8.1.1	Sukzessive Integrationsschritte	92
	8.1.2	Weiterer Handlungsbedarf	100
8	.2 Fas	seroptische Greifkraftsensorik	101
	8.2.1	Mögliche Konzepte	103
	8.2.2	Experimenteller Aufbau und erste Ergebnisse	109
	8.2.2	2.1 Versuchsaufbau mit aufgeklebter Reflektorfolie	110
	8.2.2	2.2 Ergebnisse	111
	8.2.2	2.3 Versuchsaufbau mit verchromter Pinzette	112
	8.2.2	2.4 Ergebnisse	113
	8.2.3	Weiterer Handlungsbedarf	115
9	Erge	bnis	117
10	Ausb	blick	119
11	Zusa	mmenfassung	123
12	Liter	ratur	125

Verzeichnis der Abkürzungen

CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
FEM	Finite Elemente Methode
FOS	Faseroptische Sensoren
GK-REM	Großkammer-Rasterelektronenmikroskop
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
LCD	Liquid Crystal Display
LIGA	Lithographie Galvanoformung Abformtechnik
LSM	Laser-Scanning-Mikroskop
LWL	Lichtwellenleiter
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MILOS	Modular In-Line Observation System
MOEMS	Micro Opto Electro Mechanical System
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MST	Mikrosystemtechnik
PANDA	Polarization Maintaining and Absorption Reducing
PIXEL	Picture Element
REM	Rasterelektronenmikroskop
RWTH	Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule
SiO ₂	Siliziumdioxid
SMD	Surface Mounted Device

Verzeichnis der Formelzeichen

In Abschnitt 5

c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
с	Lichtgeschwindigkeit in Materie
n	Brechungsindex (im optisch dichteren Medium)
n'	Brechungsindex (im optisch dünneren Medium)
α	Einfallswinkel
α	Brechungswinkel
NA	numerische Apertur
α_T	Grenzwinkel der Totalreflexion
n_1	Brechungsindex des Faserkerns
n_2	Brechungsindex des Fasermantels
$artheta_0$	Einfallswinkel bei der Einkopplung in die Faser
ϑ_l	Brechungswinkel in der Faser
β	Winkel
n_L	Brechungsindex von Luft
d	Kerndurchmesser der Faser
λ	Wellenlänge
Δt	Laufzeitunterschied
L	Länge des Lichtwellenleiters
Р	Lichtleistung am Ausgang
P_0	Lichtleistung am Eingang
α_D	Dämpfungskonstante
I_1	Eingangsintensität
I_2	Ausgangsintensität
λ_0	Wellenlänge des eingekoppelten Lichts
Ι	Intensität des einfallenden Lichts
Ir	Intensität des reflektierten Lichts
М	Meßgröße

In Abschnitt 6

Р	Empfangsleistung
S	Abstand
U	Spannung
I	Stromstärke

In Abschnitt 7

X _{Eingang}	Eingangskoordinate in x-Richtung
XAusgang	Ausgangskoordinate in x-Richtung
YEingang	Eingangskoordinate in y-Richtung
YAusgang	Ausgangskoordinate in y-Richtung
v	Verstärkungsfaktor
Κ	Modulation bzw. Kontrast
Kʻ	Modulation eines optischen Systems
L _{max}	maximale Helligkeit
L_{min}	minimale Helligkeit
Ε	Leuchtdichte
$I_{x,y}(n)$	Intensität der n-ten Faser im Raster mit den Koordinaten (x,y)
$I_0(n)$	Gesamtintensität der n-ten Faser
$A_{x,y}$	Flächenanteil der Faser im Raster mit den Koordinaten (x,y)
A_0	Gesamtfläche des Faserkerns

In Abschnitt 8

d	Abstand der Faserachsen
r	Radius des Faserkerns
NA	numerische Apertur
D	Abstand zwischen Faser und reflektierender Oberfläche

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich ein Zweig innerhalb der Natur- und Ingenieurwissenschaften etabliert, der einen vergleichbaren Einfluß auf die weitere technologische und gesellschaftliche Entwicklung haben könnte wie die Mikroelektronik – die Mikrosystemtechnik.

Die Mikrosystemtechnik wird vielfach als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts bezeichnet, da sie das Potential hat, durch innovative Technologien eine Vielzahl neuer Anwendungsfelder zu eröffnen [BoCl 98, Eh 95]. Neu entstandene Produkte verrichten im Bereich der Fahrzeugtechnik, der Kommunikationstechnik oder der Medizintechnik bereits heute teilweise unbemerkt und schon wie selbstverständlich ihren Dienst [MST 97b, MST 98, MST 97a].

Im weltweiten Vergleich mit anderen Nationen liegt der Industriestandort Deutschland im Bereich der Mikrotechnik mit an der Spitze. Um diese Stellung zu halten, muß der technologische Vorsprung innerhalb dieser durch einen hohen Grad an Interdisziplinarität geprägten Technologie weiter ausgebaut und das hohe Ausbildungsniveau konsequent genutzt werden. Mit einer ganzen Anzahl von Förderprogrammen wird deshalb versucht, neben der Grundlagenforschung auch die Entwicklung neuer Produkte voranzutreiben.

Trotzdem ist der Durchbruch noch nicht geschafft [Ha 99]. Gerade klein- und mittelständische Unternehmen schrecken vor den Investitionen in Größenordnungen von mehreren Millionen D-Mark und den Risiken bei der Einführung eines mikrosystemtechnischen Produktes zurück. Das liegt unter anderem daran, daß neben fehlenden Standards die Montage von nicht monolithisch aufgebauten Systemen besonders zeit- und kostenintensiv ist, da hier in der Regel auf Handarbeit zurückgegriffen werden muß [PfBr 97a, Ja 96]. Zu einer kostengünstigen, automatisierten Montage, welche die manuellen Arbeitsschritte ersetzt und gleichzeitig qualitativ hochwertige Produkte hervorbringt, ist die Überwachung und die anschließende simultane Steuerung der Handhabungs- und Fügeprozesse unabdingbar. Hier setzen die Untersuchungen und Entwicklungen ein, die in dieser Dissertation dokumentiert sind.

Der Schwerpunkt liegt dabei in der Nutzung faseroptischer Sensoren, die aufgrund verschiedener Vorteile bezüglich Bauraum, Funktionsprinzip, Störanfälligkeit und der Kombinationsmöglichkeit mit anderen Überwachungsverfahren für diese Aufgabe prädestiniert sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden neue Möglichkeiten faseroptischer Sensoren und speziell die Potentiale eines faseroptischen Multisensorsystems hinsichtlich des Einsatzes in der Mikrosystemtechnik untersucht. Die Basis bildet dabei der konzeptionelle Entwurf eines flexibel gestaltbaren Bildleiters sowie die Entwicklung des für die Realisierung dieses Konzeptes notwendigen Verfahrens zur Kalibrierung von inkohärenten Lichtwellenleiterbündeln. Die daraus erwachsenen innovativen Anwendungsmöglichkeiten werden am konkreten Beispiel der Prozeßüberwachung bei der Montage von Mikrosystemen aufgezeigt.

Den Abschluß der Arbeit bildet ein Ausblick auf weitere Entwicklungs- und Anwendungsmöglichkeiten, die sich mit Hilfe dieser neuen Technologie in Zukunft ebenfalls realisieren lassen.

2 Einführung in die Mikrosystemtechnik

Der Begriff Mikrosystemtechnik (MST) ist aus den Begriffen Mikrotechnik und Systemtechnik gebildet worden. Im internationalen Sprachgebrauch werden die Akronyme MEMS oder MOEMS benutzt, die sich aus *Micro Electro Mechanical System* beziehungsweise *Micro Opto Electro Mechanical System* zusammensetzen. Häufig findet man in einem Kontext auch die Verbindung der Abkürzungen zu MEMS/MST.

2.1 Definitionen der Mikrosystemtechnik

Es existieren viele Definitionen der Mikrosystemtechnik, die je nach Sichtweise und Interesse des Verfassers variieren. Von den zahlreichen Varianten sollen stellvertretend hier drei genannt werden.

Das Bundesministerium für Forschung und Technologie veröffentlicht im Rahmen des Förderprogramms "Mikrosystemtechnik 1994-1999" folgende Definition:

Werden Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren in miniaturisierter Bauform so zu einem Gesamtsystem verknüpft, daß sie "empfinden", "entscheiden" und "reagieren" können, spricht man von einem Mikrosystem. Hierbei ist entscheidend, daß die Funktionen eigenständig erfolgen. [BMBF 94] Ein Lehrbuch, das einige Jahre später erscheint, faßt die Definition weiter:

Die Mikrosystemtechnik umfaßt den Entwurf, die Fertigung und die Applikation von miniaturisierten technischen Systemen, deren Elemente und Komponenten typische Strukturgrößen im Mikrometer- und Nanometerbereich haben. [GeDö 97]

In der NEXUS Studie wird die Mikrosystemtechnik wie folgt definiert (frei übersetzt):

Mikrostrukturprodukte (Mikrokomponenten) besitzen Strukturen im Bereich einzelner Mikrometer und erhalten ihre technische Funktion durch die Gestalt dieser Struktur. Mikrosysteme kombinieren mehrere Mikrokomponenten mit zwei oder mehr Funktionen zu einem optimierten vollständigen System - in vielen Fällen einschließlich Mikroelektronik. [NEX 98]

Es wird deutlich, daß sich der Anspruch an ein Mikrosystem im Verlauf der Jahre reduziert hat. Speziell die Bedeutung des Begriffs "System" ist in letzter Zeit stark verwässert worden. Mittlerweile werden auch Mikromotoren oder Mikrogetriebe als Mikrosystem bezeichnet.

Gleichgeblieben ist allerdings die Dimension, die Oberflächen oder einzelne Komponenten und vereinzelt ganze Baugruppen besitzen (Bild 2.1).



Bild 2.1: Ein Mikrozahnrad im Vergleich mit einer Ameise (Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe)

2.2 Historische Entwicklung

Viele Autoren von Lehrbüchern sehen in der Mikrosystemtechnik die logische Konsequenz der Mikroelektronik [MeBI 93]. Während die Mikroelektronik zunehmend zur Halbleitertechnik wurde, mit der gleichartige Strukturen millionenfach mit höchster Präzision auf einem Wafer produziert werden, erweitert die Mikrosystemtechnik die Elektronik um die Mikromechanik, die Mikrofluidik und die Mikrooptik [GeDö 97]. Die Entwicklung der Mikrosystemtechnik begann in den siebziger Jahren unter der Bezeichnung Mikromechanik. Ziel war zunächst die Miniaturisierung von mechanischen Bauteilen und deren funktionelle Verbindung mit der Mikroelektronik. Hierfür konnte auf Erfahrungen aus der Feinwerktechnik und der Halbleitertechnik zurückgegriffen werden. Speziell die Silizium-Mikromechanik, die der Mikroelektronik zum Durchbruch verhalf, sollte hier ebenfalls Anwendung finden. Jedoch zeigte sich schnell, daß alleine durch Belichten und Ätzen von Halbleitermaterial bei weitem nicht alle Anforderungen an Form und Funktion erfüllt werden konnten.

Erst Anfang der achtziger Jahre wurde ein Verfahren entwickelt, das vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Form und Material offenbarte. Das unter der Abkürzung LIGA für Lithographie, Galvanoformung und Abformtechnik bekannte Verfahren nutzt die gegenüber anderen Strahlquellen große Tiefenschärfe der Synchrotonstrahlung aus, um wesentlich dikkere Resistschichten zu strukturieren. Es ergeben sich somit große Aspektverhältnisse von bis zu 100. Das letztendlich entstehende Negativ der Resiststruktur eignet sich hervorragend, um beispielsweise mittels Kunststoffspritzguß eine große Anzahl von Bauteilen herzustellen [EhLe 95]. Weitere Formwerkzeuge für den Kunststoffspritzguß oder für Heißprägeverfahren sowie mikrotechnische Bauteile können auf Ultrapräzisionsmaschinen auch spanend, per Erosion oder Laser hergestellt werden [WeHo 96, LuYo 99, RiSc 99, ReBr 99, VDI 96, Me-Ve 98]. In jüngster Zeit macht sich in diesem Bereich ein wahrer Boom bemerkbar, der zur Folge hat, daß die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik weltweit an unzähligen Instituten und Forschungseinrichtungen untersucht werden.

Bekannteste Beispiele für mikrosystemtechnische Produkte sind zur Zeit der Airbag-Sensor, der Tintenstrahldruckkopf sowie verschiedenste Sensorapplikationen.

2.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Mikrosystemtechnik

Besonders die Entwicklung der LIGA-Technik ließ die Hoffnung auf einen kommerziellen Durchbruch einer eigenständigen Mikrosystemtechnik innerhalb Deutschlands bzw. Europas wach werden, die im internationalen Vergleich mit anderen Hochtechnologieländern eine führende Position einzunehmen vermag. Die öffentliche Förderung ließ nicht lange auf sich warten. Besonders kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), wie zum Beispiel Unternehmen aus der Feinwerktechnik, der Sensor- und Aktuatorherstellung sollten von einem Innovationsschub profitieren [We 98]. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Mikrostrukturierung sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik haben in den letzten Jahren auch eine beeindruckende Zahl mikrosystemtechnischer Prototypen hervorgebracht. Von einer relevanten, kommerziellen Marktumsetzung, abgesehen von einigen Exponaten, kann hingegen noch keine Rede sein, besonders im Hinblick auf die KMU [VDI 97]. Woran liegt das?



Bild 2.2: Umsatzprognosen der MST gemäß verschiedener Marktstudien

Der Mikrosystemtechnik wurde zu Beginn ihrer Entwicklung ein riesiges Marktpotential zugeschrieben [Fu 94]. Manche Experten prognostizierten für die Branche sogar ein stärkeres Wachstum als für die Mikroelektronik. Im Laufe der Zeit sind viele Marktstudien erstellt worden, die aber untereinander nur sehr schwer zu vergleichen und für sich alleine mit Vorsicht zu genießen sind [SPC 94, SEMI 96, Br 96, Th 97, WeEl 98]. Je nach Interessenlage werden verschiedene Basisdaten herangezogen, entsprechende Schlußfolgerungen abgeleitet und Prognosen für die Zukunft gegeben (Bild 2.2).

Läßt man die in den meisten Studien mit aufgenommenen Sensoren und Massenspeicher, die in großen Stückzahlen produziert werden, außen vor, so ergibt sich für viele Produkte nur ein Markt mit geringen bis mittleren Absatzzahlen. Der Markt also, der typischerweise von KMU bedient wird, wächst bei weitem nicht so stark, wie vormals angenommen. Die Hauptursache liegt dabei im geringen Return on Invest. Obwohl die Fertigung einzelner Komponenten weitestgehend beherrscht wird, gestaltet sich die Montage eines hybrid aufgebauten Mikrosystems nicht nur aufgrund fehlender Standards als sehr komplex. Zusätzlich werden noch hohe Forderungen hinsichtlich Präzision und Flexibilität an die Handhabungs- und Fügeverfahren gestellt, die mit großen Investitionen verbunden sind.

Das hat derzeit zur Folge, daß die möglichen Produkte überproportional verteuert werden und sich deshalb auf dem Markt nicht durchsetzen können. Für kleinere und mittlere Unternehmen ist auch deshalb das Risiko, in diese Technologie zu investieren, viel zu hoch.

So kommt auch eine Studie, die im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg durchgeführt wurde, zu dem Ergebnis, daß die Produktionstechnik für miniaturisierte Komponenten und Systeme das größte Hindernis für eine erfolgreiche Markteinführung der Mikrosystemtechnik darstellt. Handlungsbedarf wird vor allen Dingen bei kleinen und mittelständischen Unternehmen gesehen, die kleine Losgrößen produzieren [BiCu 99].

Um die notwendigen Investitionen in Grenzen zu halten, ist ein hoher Flexibilitätsgrad in der Produktion erforderlich [ReHö 97]. Mit verhältnismäßig geringem Aufwand müssen verschiedene Produkte hergestellt werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es aber noch intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Ansätze zur Lösung dieser Problematik werden unter anderem im Sonderforschungsbereich 440: "Montage hybrider Mikrosysteme" an der RWTH Aachen erarbeitet und umgesetzt.

3 Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, wird der Mikrosystemtechnik eine hohe wirtschaftliche Bedeutung prognostiziert. Es ist aber auch gezeigt worden, daß die bestehenden Hindernisse für eine erfolgreiche Markteinführung vor allen Dingen auf die fehlende beziehungsweise viel zu teure Produktionstechnik zurückzuführen sind. Insbesondere bei der Montage von hybrid aufgebauten Mikrosystemen ist hier nicht nur eine flexible Handhabungs- und Fügetechnik gefragt, sondern auch eine adäquate Prozeßüberwachung, die qualitativ hochwertige Produkte garantiert.

Wo steht aber nun die Produktionstechnik und die mit der Produktionstechnik verbundene Prozeßüberwachung?

3.1 Stand der Technik

In der Regel werden hybride Mikrosysteme, wie zum Beispiel der in Bild 3.1 dargestellte Mikromotor inklusive Getriebe, manuell unter einem Vergrößerungsglas oder Mikroskop montiert (Bild 3.1) [Ja 96]. Neben der manuellen Montage sind in den letzten Jahren verschiedene Ansätze zur automatisierten Montage von Mikrosystemen vorgestellt worden [Zü-Fi 96, ReHö 97, PoPo 97, ScGr 99]. Dabei handelt es sich meist jedoch um spezifische Einzellösungen, die auf eine spezielle Baugruppe oder ein einzelnes Produkt abgestimmt sind. Für einen flexiblen Einsatz in der Industrie selbst bei eingeschränktem Produktspektrum sind diese Lösungen jedoch nicht verwendbar.



Bild 3.1: Manuelle Getriebemontage mit einer Pinzette

Um eine sichere Montage in diesen Dimensionen überhaupt durchführen zu können, ist die Beobachtung des Prozesses unabdingbar. Ein anschauliches Beispiel: Wieviel Menschen haben Schwierigkeiten ohne Hilfsmittel einen dünnen Faden einzufädeln? Wie hoch sind da die Erfolgsaussichten, wenn der Faden und das Nadelöhr noch mindestens zehnmal kleiner sind?

Die Beobachtung geschieht derzeit, wie schon erwähnt, hauptsächlich durch Mikroskope. In wenigen Fällen werden die Mikroskopbilder inzwischen mit Verfahren der Bildverarbeitung analysiert, um Positionen von Bauteilen oder ähnliche Merkmale zu erhalten.

Eine in diesem Zusammenhang zu nennendes Beispiel stellt das Montagesystem dar, das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt und aufgebaut wurde (Bild 3.2). Dieses Handhabungssystem besteht aus einem hochgenauen, direktangetriebenen xy-Tisch mit starr darüber montierter Hub- und Drehachse.



Bild 3.2: Mikromontagestation des Forschungszentrums Karlsruhe

Es zeichnet sich durch ein Arbeitsvolumen von 200 mm x 200 mm x 100 mm und einer Positioniergenauigkeit von $\pm 2 \,\mu$ m aus. Der Greif- und Positionierprozeß wird mit einem seitlich angebrachten Stereomikroskop beobachtet. Die Montage eines mikrooptischen Duplexers wird eingelernt [GeEn 98].



Bild 3.3: Manipulationssystem der ETH Lausanne

Ein weiteres Beispiel beruht auf einer Entwicklung der Eidgenössischen Technischen Hochschule von Lausanne. Unter einem Mikroskop werden mit Hilfe eines Vakuumgreifers Bauteile gegriffen, zueinander positioniert und gegebenenfalls bearbeitet (Bild 3.3) [Sa 98].

Die beiden Beispiele sind nicht nur ausgewählt worden, um den neusten Stand der Technik bei der Montage von Mikrosystemen zu veranschaulichen, sondern auch deshalb, weil sich daran zwei entscheidende Einschränkungen in bezug auf die Prozeßüberwachung und damit auch auf die Möglichkeit zur Automatisierung verdeutlichen lassen.

Die meisten Montageplätze sind wie die beiden stellvertretend genannten auch mit bildgebenden Systemen und entsprechenden Optiken zur Vergrößerung des Arbeitsraumes ausgestattet. Dabei ist die Montage unter einem Mikroskop sicher die am häufigsten anzutreffende Variante. Aufgrund des geringen Abstandes zwischen Objekt und Objektiv, der mit zunehmender Vergrößerung immer kleiner wird, ist es nahezu unmöglich, komplexere Montageaufgaben zu realisieren. Die Handhabungssysteme müssen sehr klein sein und können in der Regel nur seitlich zugeführt werden (vgl. Bild 3.3). Hinzu kommt, daß die Schärfentiefe eines Mikroskops sehr gering ist. Das hat zur Folge, daß bei ausgedehnten dreidimensionalen Bauteilen nur eine Ebene scharf gesehen werden kann (Bild 3.4) und es im ungünstigsten Fall zu einer Kollision mit dem Objektiv kommt, wenn die tiefer gelegenen Schichten beobachtet werden sollen.



Bild 3.4: Mikroskopisches Bild eines Mikrorotors

Im Vergleich dazu erhält man bei Verwendung eines Rasterelektronenmikroskops (Bild 3.5) oder eines Stereomikroskops zwar einen dreidimensionalen Eindruck, die Einschränkungen bezüglich der Montage bleiben aber bestehen.



Bild 3.5: REM-Aufnahme des Mikrorotors (Quelle: Fraunhofer IPT)

Selbst bei Verwendung eines Großkammer-Rasterelektronenmikroskops (GK-REM) [Hü 98] hat man trotz des großen Arbeitsabstandes und der hohen Auflösung das Problem, daß das Objekt wie bei dem System aus Karlsruhe unter einem Winkel betrachtet wird. Die zusätzlichen Einschränkungen, die das Vakuum mit sich bringt, seien hier einmal außer Acht gelassen. Die Betrachtung unter einem Winkel, der sich unter Umständen während der Montage auch noch ändert, erschwert eine präzise Steuerung des Handhabungssystems, da zunächst die Koordinatensysteme von Beobachtungssystem und Positioniersystem in einander umgerechnet werden müssen. Mit Hilfe von Referenzmarken ist das zwar möglich, aber doch sehr aufwendig und rechenintensiv.

Das vorrangige Ziel der meisten Entwicklungen in der Prozeßüberwachung ist und bleibt daher weiterhin die Beobachtung des Montageprozesses. Nur ansatzweise wird versucht, aus diesen Beobachtungen heraus Rückschlüsse auf andere Kenngrößen wie zum Beispiel die Greifkraft zu ziehen. Die zahlreich existierenden Sensoren zur Kraft, Druck oder Beschleunigungsmessung sind in der Regel aufgrund ihres Bauraums und weiterer nachteiliger Randbedingungen nicht geeignet, um zusätzlich erforderliche Kenngrößen aufzunehmen. Am ehesten könnten hier noch miniaturisierte Dehnungsmeßstreifen [HePi 97] oder piezoresistive Sensoren verwendet werden [GöHe 94, El 96]. Erste Untersuchungen zur Erfassung der Greif- und Fügekräfte mittels eines faseroptischen Sensors sind in [Ma 99] dokumentiert.

Die derzeitige Situation bei der Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik läßt sich insgesamt wie folgt charakterisieren:

- Eine Beobachtung wird in der Regel von außen, unter einem Winkel oder in geringem Abstand vorgenommen.
- Es existiert kaum integrierte Sensorik zur Erfassung mechanischer Parameter.
- Die bestehenden Ansätze zur Sensorintegration sind fest mit einem speziellen Greifer verbunden.
- Die Informationen aus Bild- und Sensordaten werden getrennt weiterverarbeitet.
- Eine zusätzlich integrierte Bearbeitung beispielsweise durch Laserstrahlung ist nicht vorhanden beziehungsweise wird von außen zugeführt.
- Eine Rückführung der Daten an die Montagewerkzeuge ist kaum gegeben.

Als Fazit bleibt festzuhalten, daß die vorhandene Prozeßüberwachung stark eingeschränkt ist oder hauptsächlich aufgrund des Bauraums den Montagevorgang selbst einschränkt.

3.2 Forderungen an die Prozeßüberwachung

Wie aus dem vorangegangenen Abschnitt ersichtlich wird, sind die Forderungen, die an die Prozeßüberwachung bei der Montage hybrider Mikrosysteme gestellt werden, sehr hoch und vielschichtig.

Für die Automatisierung, speziell die Erkennung von Bauteilen und Positionierstrukturen ist ein bildgebendes Verfahren erforderlich, das mit einer Bildverarbeitung gekoppelt werden kann. Das zu verarbeitende Bild muß hinsichtlich Auflösung, Blickfeld und Blickwinkel sowie Farbgebung eine gute Qualität besitzen, um die erforderlichen Merkmale daraus zu extrahieren. Eine dreidimensionale Darstellung ist wünschenswert, aber nicht unbedingt erforderlich, wenn es nur um die Handhabung eines Bauteils geht. Für die Handhabungs- und Fügewerkzeuge muß genügend Platz vorhanden sein, damit auch kompliziertere Bewegungen unter Sicht durchgeführt werden können. Diese Forderung impliziert wiederum einen großen Arbeitsabstand zum Objekt bei gleichzeitig großer Schärfentiefe.

Andere Parameter wie zum Beispiel die Greifkraft müssen ebenfalls erfaßt werden, um eine Beschädigung der empfindlichen Oberflächenstrukturen zu vermeiden. Diese Sensorik sollte idealerweise nicht fest mit dem Greifer verbunden sein, um eine gewisse Flexibilität zu erlauben. Die Integration zusätzlicher Funktionalitäten, welche die Montage von Mikrobauteilen unterstützen oder vereinfachen, wäre ebenfalls wünschenswert.

Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus betrachtet, muß ein Prozeßüberwachungssystem robust und kostengünstig arbeiten. Gerade wenn die Investition in ein solches Gerät hohe Kosten verursacht, so wird ein Unternehmen doch erwarten können, daß es sich flexibel anwenden läßt. Die Restriktionen durch Umgebungsbedingungen dürfen nicht stark ins Gewicht fallen. Das System muß sowohl unter normalen als auch unter Reinraumbedingungen oder gegebenenfalls sogar im Vakuum arbeiten können.

Ein weiterer wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist die Erweiterbarkeit und die Kombinationsfähigkeit des Prozeßüberwachungssystems. In vielen Fällen existieren nur Insellösungen für ein bestimmtes Aufgabengebiet. Ändert sich das Produktspektrum oder die Forderungen so muß in der Regel ein neues Meß- oder Überwachungsinstrument angeschafft werden, das meist mit dem vorhandenen nicht kompatibel oder kombinierbar ist.

3.3 Fazit

Unter Berücksichtigung der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Defizite und Forderungen muß über einen neuen Ansatz für die Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik nachgedacht werden. In diesem Zusammenhang scheinen faseroptische Sensoren aufgrund der nachfolgend genannten Vorteile am besten geeignet zu sein.

Ein wesentlicher Vorteil der faseroptischen Sensoren liegt darin, daß sowohl Bilder übertragen als auch andere physikalische oder sogar bio-chemische Parameter mit Faseroptiken detektiert werden können. Mit Hilfe optischer Detektoren sind sie aufgrund des ähnlichen Ausgangssignals leicht kombinierbar [PfBr 96].



Bild 3.6: Faser vor Mikroturbine (Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe)

Obenstehendes Bild zeigt einen faseroptischen Durchflußsensor in der unmittelbaren Nähe einer Mikroturbine (Bild 3.6). Es wird deutlich, daß der faseroptische Sensor aufgrund des geringen Bauraums sehr nahe an den Ort des Geschehens herangeführt werden kann. Zusätzlich zu den geringen Durchmessern der Fasern von nur einigen 10 µm kommt hinzu, daß die Fasern sehr flexibel sind und sich individuell verlegen lassen. Ein Vorteil, der die faseroptischen gegenüber den elektrischen Sensoren hervorhebt, ist die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern, Vakuum oder extremen Temperaturen. Die Signale können über weite Strecken ohne zwischengeschaltete Verstärker übertragen werden und sind potential- und ladungsfrei.

Vom Detektionsprinzip her handelt es sich bei den faseroptischen Sensoren um ein berührungsloses Verfahren mit in der Regel sehr hoher Empfindlichkeit. Gerade in der Mikrosystemtechnik ist dieser Vorteil nicht zu unterschätzen.

4 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist es, die in Abschnitt 3 aufgezeigten Probleme bei der Prozeßüberwachung zu lösen und die gestellten Forderungen weitestgehend zu erfüllen. Zur Erreichung dieses Ziels sollen die Möglichkeiten faseroptischer Sensoren untersucht werden, die sich aufgrund verschiedenster Vorteile am besten zu eignen scheinen.

Die Bearbeitung der Problemstellung erfolgt dabei im wesentlichen in vier Schritten:

- Ausgangspunkt ist die Betrachtung der theoretischen Grundlagen faseroptischer Sensoren. Vor diesem Hintergrund kann die Auswahl geeigneter Sensorprinzipien erfolgen. Speziell die Eigenschaften und zu berücksichtigenden Randbedingungen bei der Herstellung der bildgebenden Sensoren sind für das Verständnis der nachfolgenden Schritte essentiell.
- 2. Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen schließt sich die Entwicklung eines faseroptischen Multisensorsystems an. Der Schwerpunkt wird hier auf die Kombination gleichartiger als auch verschiedener Sensoren gelegt. Um größtmögliche Flexibilität bei der Gestaltung der bildgebenden Sensoren zu erreichen, muß ein neues Konzept entwickelt und umgesetzt werden, das nicht den Einschränkungen bei der Herstellung unterliegt. Die Idee besteht in der Nutzung inkohärenter, d.h. ungeordneter Faserbündel. Mit diesen ungeordneten Faserbündeln wird es möglich, zusätzliche Funktionalitäten in den bildgebenden Sensor zu integrieren. Es ist abzusehen, daß dieses neuartige Konzept jedoch Einfluß auf weitere zahlreiche Komponenten hat, die entsprechend ausgelegt und untersucht werden müssen.

- 3. Zur Umsetzung des beschriebenen Konzepts ist die Entwicklung eines Kalibrierverfahrens notwendig. Ohne die korrekte Zuordnung der Ein- und Ausgangsseite des inkohärenten Faserbündels wird nämlich kein Bild zu erkennen sein, das sich für eine Weiterverarbeitung eignet. In qualitativer wie wirtschaftlicher Hinsicht spielt die Dauer der Kalibrierung eine wesentliche Rolle. Anzustreben ist hier ein Verfahren, welches in kürzester Zeit, benutzerfreundlich und reproduzierbar die korrekte Zuordnung sicherstellt.
- 4. Die Eignung der Ideen und Verfahren soll abschließend anhand eines konkreten Beispiels aus der Mikromontage verifiziert werden. Sowohl bildgebende Sensoren zur Positionierung des Handhabungswerkzeugs als auch einfache faseroptische Sensoren zur Greifkrafterfassung müssen dazu in den Greifer integriert werden. Diese Integration muß unter besonderer Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Forderungen erfolgen und sich an ihnen messen lassen.

Insgesamt gesehen, soll mit den Ergebnissen dieser Arbeit der Nachweis erbracht werden, daß faseroptische Sensoren in wesentlichen Kernpunkten der Prozeßüberwachung bei der Montage von Mikrosystemen anderen Sensorprinzipien überlegen sind.

5 Grundlagen faseroptischer Sensoren

Mit dem Phänomen Licht haben sich im Laufe der Zeit viele namhafte Wissenschaftler beschäftigt. Zu nennen sind hier Newton, Huygens, Maxwell und Einstein. Sie schufen mit ihren Theorien und Modellen die Grundlage für das heutige Verständnis des Lichts und dessen Eigenschaften [HeMa 89].

Die geradlinige Ausbreitung des Lichts und die starke Dämpfung bei einer Übertragung über weite Strecken bereitete lange Zeit Probleme bei technischen Anwendungen. Die Lösung dieser Problematik erfolgte 1966 mit der Erfindung des Lichtwellenleiters [KaHo 66]. Erste theoretische Untersuchungen zur Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen in einem dielektrischen Zylinder hatte es schon 1910 gegeben [HoDe 10]. Mit Lichtwellenleitern (LWL) ist es möglich, Licht quasi um die Ecke zu *biegen* und ohne nennenswerte Verluste über weite Strecken zu übertragen.

Die physikalischen Grundlagen der Lichtleitung, die speziellen Eigenschaften der Lichtwellenleiter und deren Nutzung insbesondere im Bereich der Sensorik sind Thema dieses Kapitels.

5.1 Physikalische Grundlagen der Lichtleitung

Die Strahlenoptik geht davon aus, daß Licht sich geradlinig und mit einer definierten Geschwindigkeit ausbreitet. Die Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum beträgt:

$$c_0 = 299.792.458 \frac{m}{s}$$
 Gl. 5.1

In Materie breitet sich Licht langsamer aus. Der Quotient aus der Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum und der Lichtgeschwindigkeit c in Materie ist charakteristisch für die Materie und wird als deren Brechungsindex oder Brechzahl n bezeichnet.

$$n = \frac{c_0}{c}$$
Gl. 5.2

An der Grenzschicht zweier Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex wird ein Lichtstrahl gebrochen (Bild 5.1).



Bild 5.1: Lichtbrechung an einer Grenzschicht mit unterschiedlichem Brechungsindex

Den Zusammenhang zwischen Einfallswinkel α und Brechungswinkel α ' fand der holländische Mathematiker Snellius im Jahr 1620. Das nach ihm benannte Brechungsgesetz lautet:

$$n\sin\alpha = n'\sin\alpha' = konst.$$
 Gl. 5.3

In Gleichung 5.3 ist n der Brechungsindex des optisch dichteren Mediums und n' der Brechungsindex des optisch dünneren Mediums. Die konstanten Terme werden auch als numerische Apertur *NA* bezeichnet:

$$NA = n\sin\alpha$$
 Gl. 5.4

Das Brechungsgesetz kann also auch so formuliert werden, daß bei der Brechung eines Lichtstrahls seine numerische Apertur erhalten bleibt.

Wird wie in Bild 5.1 davon ausgegangen, daß der Lichtstrahl von einem optisch dichteren auf ein optisch dünneres Medium trifft, so existiert neben dem vom Lot weg gebrochenen Lichtstrahl auch noch ein reflektierter Strahl. Hierbei gilt eine weitere Gesetzmäßigkeit der Optik, nämlich daß der Einfallswinkel gleich dem Ausfallwinkel ist. Mit zunehmendem Einfallswinkel α vergrößert sich auch der Brechungswinkel α' gemäß Gleichung 5.3, bis er im Grenzfall die 90° erreicht. In diesem Fall gibt es keinen gebrochenen Strahl mehr, sondern nur noch einen reflektierten Strahl. Der Lichtstrahl wird an der Grenzschicht der beiden Medien total reflektiert. Der Einfallswinkel, bei dem dieser Zustand eintritt, wird Grenzwinkel der Totalreflexion α_T genannt.

$$\sin \alpha_T = \frac{n'}{n}$$
 Gl. 5.5

Die Lichtleitung in Lichtwellenleitern beruht auf diesem Prinzip der Totalreflexion. Ein Lichtleiter besteht im wesentlichen aus einem Kern, der einen höheren Brechungsindex besitzt als der den Kern umgebende Mantel (Bild 5.2).



Bild 5.2: Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters

Das Licht wird im Kern der Faser geführt, solange die Strahlen den Grenzwinkel der Totalreflexion nicht unterschreiten. Trifft ein Lichtstrahl unter dem Winkel ϑ_0 auf die Stirnfläche des Lichtwellenleiters, so wird er zum Lot hin gebrochen und fällt unter dem Winkel 90° - ϑ_1 auf die Grenzschicht von Kern und Mantel. Er wird dort nur dann total reflektiert, wenn gilt:

$$\sin(90^\circ - \vartheta_1) \ge \frac{n_2}{n_1} \tag{G1. 5.6}$$

Mit den trigonometrischen Beziehungen

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$
 Gl. 5.7

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha \cos\beta \pm \cos\alpha \sin\beta \qquad \qquad \text{Gl. 5.8}$$

ergibt sich unter Verwendung der Gleichungen 5.3, 5.4, 5.5 und der Randbedingung, daß der Brechungsindex des die Faser umgebenden Mediums zu eins gesetzt wird (Brechungsindex von Luft $n_L = 1,0003$), folgende Abhängigkeit der numerischen Apertur von den Brechungsindizes des Lichtwellenleiters.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$
 Gl. 5.9

Die numerische Apertur ist eine charakteristische Größe der Faser. Sie gibt an, unter welchem maximalen Winkel noch Licht in den Lichtwellenleiter eingekoppelt werden kann.

5.2 Lichtwellenleiter

Die in den Grundlagen beschriebenen Eigenschaften des Lichts werden bei der Übertragung durch einen Lichtwellenleiter (LWL) ausgenutzt. Die Bezeichnung Lichtwellenleiter beschreibt zwar am besten die Eigenschaften, jedoch werden in der Literatur häufig auch die Begriffe Faseroptik, Glasfaser oder einfach nur Faser benutzt.

Der Begriff Glasfaser beruht auf der Tatsache, daß die ersten Lichtleiter aus Glas gefertigt wurden. Mittlerweile kann ein Lichtwellenleiter aber auch aus Kunststoff hergestellt werden oder sogar aus beiden Komponenten (Glas/Kunststoff) bestehen.

Die Lichtwellenleiter lassen sich prinzipiell in zwei Kategorien einordnen, wobei zum einen der Aufbau der Fasern zum anderen die Anzahl der übertragbaren Moden berücksichtigt wird.

Letztgenannte Kategorie teilt sich auf in Single- beziehungsweise Monomode-Fasern und Multimode-Fasern. Aufgrund von Interferenzeffekten der im Faserkern vielfach reflektierten Lichtwellen kommt es zu einer Selektion von gut übertragenen Lichtwellen mit verschiedenen Neigungswinkeln ihrer Ausbreitungsrichtung gegenüber der Faserachse. Bei Multimodefasern liegt die Zahl der übertragbaren Moden bei etwa 1.000. Monomodefasern übertragen
dagegen nur eine Mode. Dies wird erreicht, wenn der Durchmesser des Faserkerns nur wenig größer ist als die Wellenlänge des Lichts. Diese sogenannte Singlemode-Bedingung lautet:

Dabei ist *d* der Kerndurchmesser der Faser und λ die Wellenlänge des Lichts.

Wird der Aufbau der Faser betrachtet, so unterscheidet man zwischen Stufenindex- und Gradientenindexfaser. Bei der Stufenindexfaser hat der Kern in der gesamten Querschnittsfläche einen konstanten Brechungsindex. Im Gegensatz dazu nimmt bei der Gradientenindexfaser der Brechungsindex nach außen hin kontinuierlich ab (Bild 5.3). Auf diese Weise wird der Lichtstrahl kontinuierlich gekrümmt.

Stufenindexfaser

Gradientenindexfaser



Bild 5.3: Brechungsindexprofil und resultierende Lichtführung bei Stufen- und Gradientenindexfaser

Der Vorteil der Gradientenindexfaser ist, daß kurze Lichtpulse, die unter verschiedenen Winkeln in die Faser eingekoppelt werden, nahezu die gleiche Laufzeit haben, da das Licht im Randbereich des Kerns nach Gleichung 5.2 eine höhere Geschwindigkeit hat als ein Lichtstrahl, der durch die Mitte läuft. Bei den Stufenindexfasern tritt dagegen aufgrund der unterschiedlichen Laufzeit von Mittelstrahl und äußeren Strahlen eine Verbreiterung eines Lichtpulses auf, die sogenannte Dispersion. Der Laufzeitunterschied Δt in einer Stufenindexfaser berechnet sich nach folgender Formel, wobei *L* die Länge der Faser repräsentiert:

$$\Delta t = \frac{Ln_1}{c_0} (\frac{n_1}{n_2} - 1)$$
 GI. 5.11

Je geringer die Dispersion, desto größer ist die Übertragungsbandbreite des Lichtwellenleiters. Deshalb werden Gradientenindexfasern vorwiegend in der Nachrichtentechnik eingesetzt.

Im Bereich der Sensorik interessieren jedoch vielmehr die Eigenschaften der Glasfasern, die durch äußere Einflüsse verändert werden können. Deshalb soll in den folgenden Abschnitten speziell darauf eingegangen werden, um die verschiedenen Typen faseroptischer Sensoren, die in Kapitel 5.4 beschrieben werden, und deren Funktionsweise besser verstehen zu können.

5.3 Modulationsformen

Das Ausbreitungsverhalten des Lichts wird auf unterschiedliche Art und Weise beeinflußt, was zum einen störend sein kann, zum anderen aber gerade bei faseroptischen Sensoren gezielt ausgenutzt wird, um die verschiedensten physikalischen Effekte zu messen. Zu den wichtigsten Eigenschaften des Lichts zählen die Intensität (Amplitude), die Farbe (Frequenz bzw. Wellenlänge), die Phase und die Polarisation [DaCu 88].

5.3.1 Intensitätsmodulation

Die Intensität ist der Parameter, auf den letztendlich alle optischen Detektoren ansprechen. Durch Ein- oder Ausschalten von Licht oder durch Einsetzen und Verändern von Blenden sind Änderungen in der Intensität zu erreichen. In Glasfasern wird das Licht aber auch auf seinem Weg durch den Lichtwellenleiter gedämpft, d.h. die Intensität beziehungsweise die Lichtleistung am Ausgang P ist geringer als am Eingang der Faser P_0 . Sie läßt sich nach Gleichung 5.12 berechnen:

$$P = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha_D L}{10}}$$
Gl. 5.12

Mit *L* ist wiederum die Länge des Lichtwellenleiters bezeichnet. Die Dämpfungskonstante α_D nimmt in modernen Fasern Werte von 0,1 dB/km an [He 99].

Die Ursache für diese Dämpfung liegt im Aufbau der Faser. Verunreinigungen, die bei der Herstellung der Fasern im Kern eingelagert wurden, streuen das Licht und verhindern eine Weiterleitung, da die verschiedenen Teilstrahlen nicht mehr total reflektiert werden.

Eine Verletzung der Grenzwinkelbedingung tritt auch auf, wenn der Lichtleiter zu stark gekrümmt wird. Ein Teil des Lichts tritt dann, genau wie im obigen Fall, durch den Mantel aus der Faser aus und führt zu Intensitätsverlusten.

Die Intensität kann weiterhin durch äußere Einflüsse verändert werden. Beispielsweise kann der Brechungsindex in Abhängigkeit radioaktiver Strahlung verändert werden, so daß die Totalreflexion verhindert wird. Auf diese und andere Art und Weise wird die Intensitätsmodulation bei einer Vielzahl von Sensoren benutzt [DaCu 88, Ge 95].

5.3.2 Frequenzmodulation

Ob z.B. weißes Licht mit all seinen Wellenlängenanteilen von einer Glasfaser übertragen werden kann, hängt von geometrischen und materialspezifischen Größen ab. Wie aus der Single-Mode Bedingung (Gl. 5.10) ersichtlich ist, spielt der Durchmesser des Kerns sowie die numerische Apertur der Faser eine große Rolle. So kann beispielsweise langwellige Strahlung nur bei entsprechend großem Kerndurchmesser und hoher *NA* übertragen werden. Wird der Kerndurchmesser oder die *NA* zu klein, wirkt die Faser als Hochpaßfilter, d.h. nur hochfrequente bzw. kurzwellige Strahlung wird durchgelassen.

Ebenso wie bei der Intensität läßt sich auch die Frequenz durch Streuung an kleinen Teilchen verändern. Flüssigkristalle ändern ihre Farbe in Abhängigkeit der Temperatur. Beim Stark-Effekt sowie beim Zeemann-Effekt verändern sich die Spektrallinien lichtaussendender Atome aufgrund des elektrischen beziehungsweise magnetischen Feldes [Ge 95].

5.3.3 Phasenmodulation

Die Phasenlage, die interferometrisch detektiert wird, liefert die präzisesten Ergebnisse in bezug auf Änderungen physikalischer Größen. Abstandsänderungen und Rotationen lassen sich so sehr genau messen. Aber auch mechanische Größen wie Druck oder Dehnung können auf diese Art und Weise bestimmt werden.

Voraussetzung für eine interferometrische Messung ist kohärentes Licht. Nur dann treten bei Gangunterschieden von geradzahligen beziehungsweise ungeradzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge Verstärkungen respektive Auslöschungen auf.

5.3.4 Polarisationsmodulation

Licht ist seit J.C. Maxwell durch eine elektro-magnetische Welle zu beschreiben. Die Polarisation, d.h. die Vorzugsrichtung mit welcher der elektrische Feldvektor dieser elektromagnetischen Welle schwingt, wird ebenfalls für sensorische Zwecke benutzt. Beim Faraday-Effekt ändert sich z.B. der Polarisationswinkel in Abhängigkeit der magnetischen Induktion.

Herkömmliche Lichtwellenleiter sind allerdings nicht in der Lage, die Polarisation des Lichts aufrecht zu erhalten. Moderne Herstellungsverfahren erlauben jedoch mittlerweile die Fertigung von speziellen Kern- und Mantelgeometrien, so daß die Polarisation weitestgehend erhalten bleibt.

Bei der PANDA Faser (*polarization-maintaining and absorption-reducing*) werden zwei Glasstäbe zur Erzeugung mechanischer Spannungen eingebracht. Diese Spannungen sorgen dafür, daß der elektrische Feldvektor in einer bestimmten Vorzugsrichtung schwingt (Bild 5.4).



Bild 5.4: Querschnitt durch eine PANDA-Faser

Es würde den Umfang dieser Arbeit sprengen, hier alle bekannten Effekte im Detail zu erläutern. Deshalb sei der interessierte Leser auf weiterführende Literatur verwiesen [DaCu 88, Ge 95].

5.4 Faseroptische Sensoren

Faseroptische Sensoren lassen sich vielfältig unterscheiden. Eine der wichtigsten Unterscheidungsmöglichkeiten besteht in der Einteilung in intrinsische und extrinsische faseroptische Sensoren [Ge 95]. Weiterhin kann unterschieden werden nach der Art der Lichtführung. Faseroptische Sensoren können in Transmission (das Licht wird monodirektional im Lichtwellenleiter geführt) oder in Reflexion (das Licht wird bidirektional im Lichtwellenleiter geführt) betrieben werden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art des Lichtwellenleiters. Faseroptische Sensoren lassen sich sowohl in Monomode- als auch in Multimodetechnik aufbauen [DaCu 88]. Das Festlegen auf eine Lichtführungstechnologie bedingt eine Einschränkung bei der Auswahl des Modulationsprinzips, das die Meßgrößenbeeinflussung der Lichtwelle bestimmt. Im folgenden soll näher auf die Unterscheidung in intrinsische und extrinsische Sensoren eingegangen werden. Der Vollständigkeit halber seien hier noch die hybriden faseroptischen Sensoren genannt. Die bildgebenden faseroptischen Sensoren nehmen eine besondere Stellung ein. Deshalb sollen sie in einem eigenen Kapitel ausführlich behandelt werden.

5.4.1 Hybride faseroptische Sensoren

Bei den hybriden faseroptischen Sensoren dient der Lichtwellenleiter nur zur schnelleren und sichereren Signalübertragung. Der Meßaufnehmer wandelt das Meßsignal mittels optoelektronischer Koppelelemente in ein entsprechendes optisches Signal um, zum Beispiel in Lichtpulse. Diese Signale werden dann über die Faser übertragen und gelangen so zum Detektor. Dieser Sensortyp nutzt vor allen Dingen die Vorteile der faseroptischen Signalübertragung. Jedoch müssen auch die vorhandenen Nachteile bei der Auslegung des Sensors berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 5.3).

5.4.2 Intrinsische faseroptische Sensoren

Der Meßwertaufnehmer bei intrinsischen faseroptischen Sensoren ist der Lichtwellenleiter selbst. In Abschnitt 5.3 sind einige Möglichkeiten beschriebenen worden, die Einfluß auf das Übertragungsverhalten einer Glasfaser nehmen können. Durch geschickte Ausnutzung dieser Effekte lassen sich kombiniert mit angepaßten Auswerteeinheiten hochempfindliche Sensoren konstruieren. Nachfolgend sollen anhand einiger Beispiele die Funktionsweise und die Anwendungsfelder erläutert werden.

So kann beispielsweise ein Druck-, Kraft- oder Wegsensor aufgebaut werden, indem die Faser aufgrund dieser Effekte mehr oder weniger stark gekrümmt wird (Bild 5.5) [Ge 95].



Bild 5.5: Intrinsischer Sensor, der die Abhängigkeit der Intensität von der Durchbiegung ausnutzt.

Andererseits können auch nicht mechanische Größen, wie z.B. radioaktive Strahlung mit solchen Sensoren detektiert werden. In solchen Fällen ist oft eine Abhängigkeit der Brechungsindizes von der Meßgröße gegeben. Beispielsweise wird der Mantel mit Blei dotiert, so daß sich der Brechungsindex und damit auch das Übertragungsverhalten der Faser in Abhängigkeit der radioaktiven Strahlung verändert [Ge 95].

5.4.3 Extrinsische faseroptische Sensoren

Der Lichtwellenleiter dient ähnlich wie beim hybriden faseroptischen Sensor nur zur Signalübertragung. Der Unterschied liegt darin, daß der Meßwertaufnehmer direkt ein optisches Signal liefert.

Das Meßprinzip sieht in der Regel so aus, daß eine erste Faser das Licht zum Ort der Messung führt. Dort werden die Eigenschaften des Lichts durch einen Wandler infolge der Einwirkung der Meßgröße verändert. Dieses veränderte Licht wird über eine zweite Faser der Auswerteeinheit zugeführt (Bild 5.6).



I : Intensität des hinlaufenden Lichtes

Ir: Intensität des rücklaufenden Lichtes

Bild 5.6: Schematischer Aufbau eines extrinsischen Sensors

Je nach Wandlerprinzip reicht auch eine einzelne Faser aus, um das eingestrahlte und reflektierte Licht zu führen.

Bei interferometrischen Meßprinzipien wird kohärentes Licht eingekoppelt. Der Wandler verändert die Phasenlage des Lichts, so daß der reflektierte Strahl mit dem ankommenden Strahl interferiert. Hier ist also nur eine einzelne Faser erforderlich, um die Interferenz herbeizuführen. Die hin- und rücklaufenden Lichtwellen werden mit sogenannten Y-Kopplern voneinander getrennt, so daß eine Auswertung der rückläufigen Welle möglich wird.

Als Wandler werden mechanische Systeme wie Membranen oder Cantilever, aber auch bio-chemische Substanzen eingesetzt. Diese Substanzen werden in halbdurchlässigen Membranen an der Spitze des Sensors gehalten und reagieren im Idealfall katalytisch mit dem Testmedium (Bild 5.7) [Ge 95].



M: Meßgröße



Durch Farb- und/oder Reflexionsänderungen des Indikators kann so beispielsweise Blutzukker, Blutalkohol und vieles mehr bestimmt werden.

5.4.4 Bildgebende faseroptische Sensoren

Bildgebende faseroptische Sensoren stellen aufgrund ihres Aufbaus eine eigene Klasse innerhalb der faseroptischen Sensoren dar. Den meisten wird dieser Sensortyp infolge ihres Hauptanwendungsgebietes besser bekannt sein unter den Namen Fiberskop oder Endoskop.

Im Jahre 1954 hatten Ärzte erstmals die Idee, mehrere Lichtwellenleiter zu geordneten Bündeln, sogenannten Bildleitern, zusammenzufassen [Re 88]. In einem Bildleiter überträgt jede dieser Fasern einen Bildpunkt, wobei zu beachten ist, daß die relative Position der einzelnen Fasern in dem Bündel gleich bleiben muß, da sonst kein Bild zu erkennen ist (Bild 5.8).



Bild 5.8: Aufbau eines Bildleiters

Zum besseren Verständnis der Abschnitte 6 und 7 wird im folgenden auf die Herstellung von Bildleitern, die auch als kohärente Faserbündel bezeichnet werden, eingegangen.

Ausgangspunkt ist eine Quarz/Quarz Preform von etwa 2 cm Durchmesser mit vergleichsweise hohem Kern-Mantel-Verhältnis von 1:1,40 bis 1:1,45. Die numerische Apertur des späteren Bildleiters entspricht der *NA* dieser Ausgangspreform. Die *NA* liegt in der Größenordnung von 0,3, was einem Öffnungswinkel von 17,46° entspricht. Daraus wird eine Faser mit etwa 200 µm Durchmesser gezogen und in Stücken von 30 cm Länge in ein Glasrohr gesteckt (Bild 5.9) [ShUt 85]. Die Anzahl der Mutter-Fasern in diesem Glasrohr legt die Anzahl der Bildpunkte im späteren Bildleiter fest. Nach mehreren Reinigungsverfahren wird das Glasrohr evakuiert, zugeschmolzen und bei Bedarf auch kollabiert. Abschließend wird diese Bündel-Preform genauso auf einen dünnen Durchmesser gezogen, wie es in Bild 5.9 schematisch dargestellt ist. Der minimale Faserdurchmesser ergibt sich aus der Bedingung, daß der einzelne Lichtwellenleiter noch eine multimode und keine monomode Faser sein soll, um eine farbgetreue Bildübertragung zu gewährleisten (vgl. Gl. 5.10). Der typische Kerndurchmesser des einzelnen Lichtwellenleiters liegt bei etwa 5 µm [BMBF 99].

Es sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, daß bei diesem Herstellungsprozeß nur gleichartige Fasern zu einem festen Verbund verschmolzen werden. Das Einbringen von Kanälen oder Spezialfasern ist auf diese Art und Weise nicht möglich.



Bild 5.9: Schematische Darstellung des Bildleiterherstellungsprozesses

Die Technologie zur Herstellung von sehr guten Bildleitern besitzen weltweit nur wenige Unternehmen. Die qualitativ hochwertigsten Bildleiter werden zur Zeit von dem japanischen Konzern Sumitomo produziert. Auf einer Fläche mit einem Durchmesser von nur 334 µm haben bei diesen Bildleitern bis zu 10.000 Fasern Platz. Solch ein Bildleiter besitzt eine numerische Apertur von 0,35 und kann in Bereichen mit einer Temperatur von bis zu 150 °C eingesetzt werden [Sum 97].

6 Faseroptisches Multisensorsystem

Aufbauend auf den physikalischen und technischen Grundlagen faseroptischer Sensoren soll in diesem Abschnitt im Hinblick auf eine umfassende Prozeßüberwachung der Mikromontage diskutiert werden, welche Vor- und Nachteile die Kombination mehrerer gleichartiger aber auch verschiedener Sensoren mit sich bringt.

Die Einsatzmöglichkeiten werden zunächst an einfachen Beispielen erläutert, bevor im Anschluß daran das Konzept eines faseroptisches Multisensorsystems zur Überwachung der Mikromontage vorgestellt wird, das den Forderungen aus Abschnitt 3.2 Rechnung trägt.

6.1 Einsatzmöglichkeiten

Im folgenden sollen die Einsatzmöglichkeiten faseroptischer Sensoren anhand einiger einfacher Beispiele aus den Bereichen der industriellen Prozeßüberwachung aufgezeigt werden.

Der Bereich der industriellen Prozeßüberwachung wird eindeutig von den elektrischen Sensoren dominiert. Faseroptische Sensoren kommen in der Regel erst zum Einsatz, wenn ihre Vorteile sie gegenüber den anderen Sensortypen prädestinieren [PfWi 97, FrFö 97]. Das mag zum einen an dem geringen Bekanntheitsgrad dieser Technologie außerhalb der Telekommunikation zum anderen aber auch an dem verhältnismäßig großen Aufwand zur Auswertung der Sensoren liegen. In Verbindung mit Weiterentwicklungen im Bereich der Kamera- und Computertechnologie sowie im Bereich der Bildverarbeitung kann hier in Zukunft aber ein größerer Marktanteil erwartet werden. Die Beispiele, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden, sind in drei Kategorien unterteilt und beziehen sich bis auf einen Anwendungsfall auf den größten Einsatzbereich innerhalb der faseroptischen Sensorik, dem Einsatz als Teil einer Lichtschranke. Unterschieden wird zwischen einzelnen faseroptischen Sensoren, linienförmig und flächig angeordneter Sensorik.

6.1.1 Einzelne faseroptische Sensoren

In Zusammenarbeit mit einem Unternehmen für Spezialmaschinen der Textilbranche ist ein Überwachungssystem mit faseroptischen Lichtschranken entwickelt worden, das insgesamt 300 Schalterstellungen kontrolliert. Die 25 Schalter der Maschine können jeweils zwölf Positionen annehmen. Aus Kostengründen wurde hier die faseroptische Lösung einer elektrischen Alternative vorgezogen. Die 300 Lichtwellenleiter des Sensorsystems werden gebündelt und mit der von der Maschine entkoppelten CCD-Kamera simultan erfaßt und von einer entsprechenden Software ausgewertet.

Unter vielen anderen Anwendungsmöglichkeiten ist zum Beispiel die Qualitätsprüfung von Anzeigesystemen auf Position, Vollständigkeit und korrekte Farbgebung mit punktuell angeordneten faseroptischen Sensoren denkbar.

6.1.2 Linienförmig angeordnete Sensorik

Neben der Nutzung einzelner Fasern können aufgrund ihrer Flexibilität und der Dimensionen auch mehrere Lichtwellenleiter beispielsweise zu einer Zeile oder einem Ring zusammengefaßt werden. Größtenteils wird diese Technologie genutzt, um eine angepaßte Kaltlichtquellenbeleuchtung zu realisieren. Kehrt man den Prozeß um und bildet den eigentlichen Eingang eines solchen Lichtkabels auf einen lichtempfindlichen Detektor ab, so ergibt sich im Falle der Faserzeile allgemein die Möglichkeit zur Detektion von Kanten. Werden die Fasern zu einem Ring zusammengefaßt, lassen sich rotatorische Bewegungszustände erfassen. Prinzipiell ist es möglich, beliebige Konturen mit Glasfasern auszufüllen, um damit eine an das Problem angepaßte Meßeinrichtung zu schaffen. Außerdem muß sich ein derartiges Meßsystem nicht auf eine einzelne Faserzeile beschränken. Ähnlich wie bei den einzelnen Sensoren können die Fasern mehrerer Zeilen zusammengefaßt und von einem einzelnen Detektor in der oben beschriebenen Art und Weise ausgewertet werden.



In diesem Zusammenhang ist ein Prüfsystem entwickelt worden, mit dem die Anzahl und Stellung von Chipbeinchen kontrolliert werden kann (Bild 6.1).

Bild 6.1: Faseroptische Zeilensensoren zur Prüfung von Mikrochips

Zwei Faserzeilen sind entlang einer Führungsschiene so positioniert, daß die Beinchen des Chips bestimmte Fasern abschatten und somit zu einem Signal am Detektor führen. Mit einer Referenzmaske kann das System so eingestellt werden, daß festgelegte Toleranzen eingehalten werden können. Damit ist eine sichere Gut/Schlecht-Bewertung der elektronischen Bauteile gewährleistet, die eine weitere Sortierung bzw. Aussonderung erlaubt.

6.1.3 Flächig angeordnete Sensorik

Als logische Konsequenz verbleibt neben der punktuellen und zeilenförmigen Anordnung nun noch die flächige Anordnung der Lichtwellenleiter. Es muß nicht sonderlich betont werden, daß ein flächiger Sensor ebenfalls als Lichtschranke oder zur Detektion von Kanten genutzt werden kann. Es existiert jedoch ein weit größeres Anwendungsgebiet für eine zweidimensionale Anordnung der Faseroptiken. Die Bildübertragung in flexiblen Endoskopen gehört sicherlich zu einem der größten Einsatzbereiche für faseroptische Sensoren. Im industriellen Umfeld werden Endoskope hauptsächlich zur Inspektion von schwer zugänglichen Hohlräumen eingesetzt. Motoren und Flugzeugturbinen werden auf Risse und andere Verschleiß- und Alterungserscheinungen hin untersucht.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit besteht in einem Abstandsmeßsystem, daß hier näher beschrieben werden soll. Ziel der Entwicklung war es, die automatische Führung eines Nietroboters mit einen robusten und kompakten Sensor zur Bestimmung des Abstandes zu ermöglichen. Als geeignetes Sensorprinzip hat sich das Reflexkopplerprinzip herauskristallisiert. Bei einem Reflexkoppler trifft ein Lichtkegel auf eine reflektierende Oberfläche. Der reflektierte Lichtfleck und wird von einem optischen Sensor erfaßt. Ändert sich nun der Abstand zur Oberfläche, so ändert auch der Lichtfleck seine Größe beziehungsweise Form [PfEi 94].

Das eigentliche Problem bestand nun darin, Lichtquelle und Detektor in einem Sensor zu vereinigen. Gelöst wurde dieses Problem dadurch, daß um eine Monomode-Faser, die das Beleuchtungslicht führt, mehrere tausend Lichtwellenleiter angeordnet wurden, die als Detektor dienen (Bild 6.2).



Bild 6.2: Schematische Darstellung der Ein- und Ausgangsseite des Reflexkopplersensors

Im konkreten Beispiel wurden etwa 8.500 einzelne Multimode-Fasern mit einem Durchmesser von 50 µm um eine 100 µm dicke Monomode-Faser angeordnet, die an der Eingangsseite mittels zweier Stege im Zentrum des Bündels gehalten wird. Das gesamte Bündel besitzt einen Durchmesser von etwa 5 mm. Die Eingangsseite ist kreisförmig ausgelegt, während die Ausgangsseite aufgrund der besseren Ausnutzung der Detektorfläche quadratisch angeordnet ist. Zur Abbildung des Lichtflecks wurde keine zusätzliche Optik an der Spitze des Sensors verwendet.

Der schematische Aufbau dieses Sensors sowie die prinzipielle Funktionsweise ist in Bild 6.3 dargestellt [PfEi 94].



Bild 6.3: Aufbau und Funktionsprinzip des faseroptischen Reflexkopplers

Ausgewertet wurde das Signal der Empfangsfasern zunächst mit einer Fotodiode und später auch in abgewandelter Form mit einer CCD-Kamera in Kombination mit einer Bildverarbeitungskarte. Auf die Details der dimensionellen Auswertung und die softwaretechnische Realisierung soll hier nicht näher eingegangen werden.

Bei der flächigen Anordnung der Lichtwellenleiter wird im weitesten Sinne ein Bild übertragen. Jede einzelne Faser steht dabei für einen Bildpunkt. Im engeren Sinn kann aber bei dem Ausgangssignal, das der Abstandssensor liefert, nicht von einem Bild gesprochen werden, in dem Konturen oder Objekte erkannt werden könnten. Lediglich die Information über Helligkeit und Farbe ist enthalten (Bild 6.4). Es fehlt die Ordnung der Fasern zueinander (vgl. Abschnitt 5.4.4). Wie diese Ordnung wiederhergestellt werden kann, ist Thema von Abschnitt 7.



Bild 6.4: Ausgangssignal des Abstandssensors

Aber auch bei geordneten Faserbündeln treten Probleme auf, welche die Qualität des Bildes negativ beeinflussen. Da nur der Kern eines Lichtwellenleiters Licht führt, der Mantel für die Lichtleitung aber genauso erforderlich ist, wird im Bild jeder Lichtpunkt von einem dunklen Kreisring umgeben. Die Geometrie der Fasern hat zusätzlich zur Folge, daß nicht die größte Packungsdichte innerhalb der zur Verfügung stehenden Fläche des Bündels erreicht wird. Aus diesen Gründen erscheint auch ein endoskopisches Bild, das über ein Faserbündel übertragen wird, mosaikartig oder granular (Bild 6.5). Qualitativ minderwertige Bildleiter weisen zudem Fehlstellen und Verwerfungslinien auf (Bild 6.6).



Bild 6.5.: Granulare Struktur eines endoskopischen Bildes



Bild 6.6: Fehlstellen und Verwerfungslinien in einem Bildleiter

Im Hinblick auf eine automatisierte Auswertung dieser Bilder mittels Algorithmen der Bildverarbeitung, beispielsweise bei einer Kantendetektion, entstehen enorme Schwierigkeiten, da die Bildbereiche nicht zusammenhängen. Dies gilt auch für den speziellen Fall des Abstandssensors.

6.2 Einsatzmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik

In Abschnitt 3.2 sind die Forderungen, die an eine Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik gestellt werden, aufgelistet worden. Mit dem Wissen um die Möglichkeiten faseroptischer Sensoren stellt sich nun die Frage, wie Faseroptiken eingesetzt werden können, um die genannten Forderungen zu erfüllen. Anhand von Bild 6.7 sollen die wichtigsten Forderungen veranschaulicht werden [PfBr 97b].



Bild 6.7: Schematische Darstellung eines faseroptischen Multisensorsystems zur Überwachung der Mikromontage

Die Bildübertragung zur Positionierung des Greifers und zur Identifikation des Bauteils erfolgt über einen Bildleiter, der eine direkte Sicht auf da Bauteil zuläßt. Idealerweise sind in diesen Bildleiter weitere Funktionalitäten wie z.B. Beleuchtung, ein Bearbeitungslaser oder ein Abstandsmeßsystem integriert. Im Verhältnis zum Greifer und zu den Bauteilen sollte der Bildleiter nur wenig Bauraum benötigen. Anzustreben ist hier ein Durchmesser von etwa einem Millimeter. Die Greifkraft sowie weitere Parameter können über zusätzliche faseroptische Sensoren erfaßt werden. Die Aufnahme sowohl der Bild- als auch der Sensordaten kann über eine einzelne Kamera erfolgen, weil die Sensoren prinzipiell dieselben Signale, nämlich Helligkeit und Farbe, liefern. Die Auswertung und eigentliche Kombination der Signale geschieht in einem Computer, der mit diesen Signalen das Handhabungssystem steuern kann.

Kritischster Punkt in diesem Überwachungssystem ist das multifunktionale Faserbündel zur Bildübertragung. Die einfache Integration einer Spezialfaser in einen Bildleiter ist aus fertigungstechnischen Gründen nicht möglich, da der Lichtwellenleiter beispielsweise für die Übertragung von Laserstrahlung völlig andere Eigenschaften besitzen muß als die Fasern des Bildleiters. Die verschiedenen Parameter verhindern die Kombination der unterschiedlichen Fasern in einem Fertigungsschritt (vgl. Abschnitt 5.4.4).

Aus diesem Grund muß ein neues Konzept zum Aufbau des Bildleiters erarbeitet werden. Dieses neuartige Konzept sowie die Komponenten, die zur Realisierung erforderlich sind, werden in den nächsten beiden Abschnitten beschrieben.

6.3 Konzept eines multifunktionalen Bildleiters

Am Beispiel der Integration einer zentrisch im Bildleiter gelegenen Laserfaser sollen die notwendigen Änderungen beim Aufbau und der Auswertung des multifunktionalen Bildleiters veranschaulicht werden. Laserstrahlung läßt sich je nach Leistung vielfältig einsetzen: Zur reinen Beleuchtung in Verbindung mit optischen Meßsystemen, zum Fügen in Verbindung mit Loten oder zum Aushärten von Klebstoffen bis hin zum Laserschweißen. Prinzipiell lassen sich anstelle der Laserfaser auch Kapillare beispielsweise zur Absaugung von Gasen oder Zuführung von Klebstoffen integrieren. Letztendlich ist auch beides gleichzeitig möglich. In Anlehnung an den faseroptischen Reflexkopplersensor (vgl. Abschnitt 6.1.3) besteht eine Möglichkeit zur Realisierung eines multifunktionalen Bildleiters darin, einzelne Fasern um den zentrisch gelegenen Lichtwellenleiter für den Laser zu gruppieren. Im Hinblick auf eine Miniaturisierung liegt die Schwierigkeit darin, die für eine hohe Auflösung benötigte große Zahl an möglichst dünnen Fasern zu handhaben. Sind die Fasern gut handhabbar, so sind sie zu dick, um in ausreichender Zahl in dem angestrebten Gesamtdurchmesser des Faserbündels von etwa einem Millimeter untergebracht werden zu können. Im Gegensatz dazu sind sehr dünne Fasern äußerst schwer zu handhaben, da sie leicht brechen und mit bloßem Auge nicht zu sehen sind.

Die zweite Möglichkeit sieht vor, mehrere dünne Bildleiter, die so bemessen sind, daß sie gut zu verarbeiten sind, um die Laserfaser anzuordnen. Die einzelnen Bildleiter besitzen einige hundert Bildpunkte und bilden in sich ein kohärentes Bündel. Die Summe der dünnen Bildleiter ergibt jedoch wiederum ein ungeordnetes oder inkohärentes Faserbündel. Der Aufbau des geplanten multifunktionalen Bildleiters ist in Bild 6.8 schematisch dargestellt [SpBr 98].



Bild 6.8: Schematischer Aufbau des multifunktionalen Bildleiters im Schnitt

6.4 Komponenten des multifunktionalen Bildleiters

Im allgemeinen besteht ein flexibles Endoskop aus den Komponenten Mikroobjektiv, Bildleiter, Okular und Beleuchtungsfasern. Aufgrund des oben beschriebenen neuen Konzeptes ergeben sich neue Forderungen und damit auch neuartige Lösungen für die jeweiligen Komponenten. Die wesentlichen Änderungen betreffen die Mikrooptik und den neugestalteten Bildleiter, der auch eine Bildaufnahme mit entsprechender Darstellung notwendig macht, da mit bloßem Auge am Ende des insgesamt gesehen ungeordneten Faserbündels kein Bild zu erkennen ist.

6.4.1 Kombinationsoptik

Die Anforderungen an das Mikroobjektiv an der Spitze des Bildleiters teilen sich in zwei Bereiche. Zunächst muß wie bei herkömmlichen Endoskopen auch das Objekt auf den Bildleiter projiziert werden. Dazu ist ein Objektiv mit großem Öffnungswinkel erforderlich. Andererseits muß die Laserenergie auf einen möglichst engen Bereich fokussiert werden, um die benötigte Energiedichte für eine Bearbeitung zu erreichen. Die Auslegung der reinen Laseroptik hängt dabei von den Parametern der Laserquelle und den Forderungen an den Laserstrahl ab.

Diese beiden an sich gegenläufigen Forderungen können nur mit einer Linse, deren Oberfläche eine asphärische Kontur aufweist, gleichzeitig realisiert werden. Mit einem neuartigen Fertigungsverfahren ist es gelungen, die berechnete Geometrie der Linse auch tatsächlich herzustellen [BMBF 99]. Die fertige Linse ist in Bild 6.9 zu sehen. Sie besitzt einen Durchmesser von 0,8 mm und eine Höhe von 1,8 mm.



Bild 6.9: Asphärische Mikrolinse mit einem Durchmesser von 0,8 mm (Quelle: LIMO)

Die Funktionalität der Linse wurde sowohl simuliert als auch praktischen Tests unterzogen. Die Anordnung zur Simulation der Fokuseigenschaften der Linse ist in Bild 6.10 gezeigt.



Bild 6.10: Anordnung für die Simulation der Mikrolinse (Quelle: LIMO)

Unter Verwendung eines fasergekoppelten Lasers mit einem Faserkerndurchmesser von 50 µm und einer numerischen Apertur von 0,12 wurde ein Laserspot mit dem Durchmesser von 200 µm gewählt. Bild 6.11 verdeutlicht das entsprechende Ergebnis der Simulation.



Bild 6.11: Simulationsergebnis der Fokussierung (Quelle: LIMO)

Zur Überprüfung der Abbildungseigenschaften ist die Linse praktischen Tests unterzogen worden. Dazu wurden Gitterstrukturen mit verschiedenen Gitterkonstanten mit der Mikrolinse auf die Endfläche eines Faserbündels mit etwa 10.000 Fasern abgebildet. Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen, daß sogar Strukturen von weniger als 10 µm abbildbar sind (Bild 6.12a-d).



a) 10 Linien / mm



c) 50 Linien / mm



b) 25 Linien / mm



d) 100 Linien / mm



6.4.2 Neugestalteter Bildleiter

Der Bildleiter soll aufgrund der zentrisch liegenden Laserfaser aus mehreren dünneren kohärenten Faserbündeln aufgebaut werden. Erstes Ziel war es deshalb, dünne Bildleiter mit möglichst vielen Bildpunkten und einer hohen numerischen Apertur herzustellen. Mit diesen Bildleitern sind dann erste Labormuster aufgebaut worden. Bild 6.13 zeigt die Stirnfläche eines ersten Modells, bei dem sechs Bildleiter mit jeweils 3000 Bildpunkten und 200 µm aktivem Durchmesser sowie eine zentrale Multimode Laserfaser mit 50 µm Kerndurchmesser in einem Messingröhrchen zusammengefaßt worden sind. Um das Röhrchen sind die Fasern zur Beleuchtung angebracht. Der Gesamtdurchmesser beträgt 1,5 mm.



Bild 6.13: Erstes Labormuster des multifunktionalen Bildleiters (Quelle: CeramOptec)

Mit dieser Anordnung sind erste Bilder aufgenommen worden. Dabei wurden zwei Dinge deutlich. Zum einen muß das Bildleiterbündel kalibriert werden, um überhaupt ein Bild in der gewünschten Form zu erkennen. Zum anderen sind die Abstände der einzelnen Bildleiter noch zu groß. Das Bild weist zu große Lücken auf.

Im weiteren Verlauf der Arbeiten ist im Bereich der Bildleiterentwicklung der Schwerpunkt deshalb auf die Erhöhung der Packungsdichte gelegt worden. Um diese zu erreichen, sollten die einzelnen Bildleiter eine annähernd hexagonale Form haben. Ein solcher Bildleiter mit etwa 340 Bildpunkten ist in Bild 6.14 dargestellt.



Bild 6.14: Hexagonaler Bildleiter mit ca. 340 Fasern (Quelle: CeramOptec)

Aus diesen Bildleitern ist dann ein sehr dicht gepacktes Endoskop aufgebaut worden (Bild 6.15). Das gesamte Bündel hat einen Außendurchmesser von 800 μ m und besteht aus insgesamt 18 Bildleitern mit jeweils 340 Fasern, also aus insgesamt 6.120 Bildpunkten. Zentrisch ist eine Laserfaser mit Kerndurchmesser von 50 μ m und einem Manteldurchmesser von 125 μ m integriert. Die numerische Apertur der Bündel beträgt 0,22.



Bild 6.15: Dicht gepacktes Bündel mit hexagonalen Bildleitern (Quelle: CeramOptec)

6.4.3 Bildaufnahme

Die durch den neuartigen Bildleiter verursachte Unordnung erfordert ein Kalibrieren, d.h. ein Zuordnen von Ein- und Ausgangsseite. Dafür muß das Bild aber in elektronischer Form vorliegen. Deshalb wird die Ausgangsseite des multifunktionalen Bildleiters mit einer weiteren Optik auf einen Detektor abgebildet.

6.4.3.1 Fotodiode

In der Regel werden Fotodioden eingesetzt, um einen einzelnen faseroptischen Sensor auszuwerten (vgl. Abschnitt 5.4.3) oder den Mittelwert mehrerer Sensoren zu erhalten. Die Fotodiode ist ein Halbleiterbauelement. Ihr Funktionsprinzip beruht auf der Absorption von Licht im pn-Übergang, die zu einer Generation von Elektronen-Loch-Paaren führen (Bild 6.16). Bei einem äußeren Kurzschluß oder bei anliegender Sperrspannung trennt das elektrische Feld im pn-Übergang die Elektronen und Löcher voneinander, bevor eine merkliche Rekombination



stattfinden kann. Dadurch wird der Sperrstrom erhöht. Diese Sperrstromerhöhung ist von der Intensität des einfallenden Lichts abhängig [Pf 98].

Bild 6.16: Funktionsprinzip einer Fotodiode

Das elektrische Ausgangssignal einer Fotodiode kann direkt zur Anzeige gebracht oder mit einem Analog/Digital-Wandler digitalisiert und zur Weiterverarbeitung in einem Rechner genutzt werden.

Die herkömmliche Auswertung einer Vielzahl faseroptischer Sensoren mit einzelnen Fotodioden würde einen hohen schaltungstechnischen Aufwand und viel Bauraum erfordern. Zusätzlich würde die Digitalisierung hohe Kosten verursachen.

Im Gegensatz dazu gibt es zwei optoelektronische Bauelemente, die auf kleiner Fläche eine große Zahl von lichtempfindlichen Detektoren miteinander verknüpfen: Der CCD-Chip und der CMOS-Chip. Diese Chips werden vorwiegend in kompakten Kameras zur Bildaufnahme eingesetzt, wobei die CCD-Technologie bislang eine weitere Verbreitung erreicht hat.

Die Funktionsprinzipien dieser beiden Kameratypen sowie die daraus resultierenden Vor- und Nachteile sind Thema der beiden nächsten Abschnitte.

6.4.3.2 CCD-Kamera

CCD-Bildaufnehmer bestehen aus einer matrixförmigen Anordnung von zum Teil über 10⁶ MOS Kondensatoren, von denen jeder einen einzelnen Bildpunkt ("Pixel" aus dem englischen *picture element*) repräsentiert. Die Abkürzung MOS steht für *metal oxide semiconductor* (Metalloxyd Halbleiter). Ein MOS Kondensator (Bild 6.17) besteht in der Regel aus einer p-dotierten Siliziumschicht, einer Isolatorschicht und einer Elektrode.



Bild 6.17: Aufbau eines MOS Kondensators

Licht, das auf das p-dotierte Substrat trifft, erzeugt dort Elektronen-Loch-Paare, deren Anzahl von der Belichtungsstärke und der Belichtungsdauer abhängt. Aufgrund der angelegten Spannung werden die Ladungen getrennt. Die negativ geladenen Elektronen werden zur positiven Elektrode hin gezogen, sammeln sich allerdings unter der Isolatorschicht, da sie nicht abfließen können. Ihre Anzahl ist ein direktes Maß für lokale Belichtung in dem betrachteten Bildpunkt.

Um die Elektronen aus allen Bildpunkten auszulesen, wird das ladungsgekoppelte Transportsystem angewendet, dem das CCD Element seinen Namen verdankt: CCD steht für *charge coupled device* (ladungsgekoppeltes Bauelement). Hierbei werden durch systematisches Anlegen von Spannungen an eine oder mehrere Elektroden die angesammelten Elektronen von einer Elektrode zur nächsten geschoben, bis sie die Ausgangsstufe erreichen, in der sie in ein Spannungssignal umgewandelt werden, das als Videosignal genutzt wird. Die Verschiebung der Ladungen von einer Elektrode zur anderen dauert ca. 60 ns. Das heißt, alle 60 ns wird am Videoausgang ein Pixel ausgelesen.

Die lichtempfindlichen Pixel besitzen eine Größe von typischerweise 5 - $10 \,\mu$ m Kantenlänge und werden in einem regelmäßigen Raster angeordnet. Bild 6.18 zeigt die Struktur eines flächigen CCD-Chips.



Bild 6.18: Struktur eines CCD-Chips

In einem CCD-Chip ist für die Durchführung des Ladungstransfers jeder lichtempfindlichen Spalte noch eine zusätzliche abgedunkelte Spalte zugeordnet, die im Prinzip ein analoges Schieberegister darstellt. Entsprechend dem von außen angelegten Spannungstakt werden die Ladungen der lichtempfindlichen Pixel nach der Belichtungszeit zuerst spaltenweise in dieses analoge Schieberegister geschoben und dort zwischengespeichert. In einem nächsten Schritt werden dann die Spalten durch Anlegen einer Spannung mit niedrigerer Taktfrequenz ausgelesen. Das Auslesen eines Bildes geschieht in der Regel durch Übertragung zweier Halbbilder. Während das eine Halbbild aus allen ungeraden Zeilen ausgelesen wird, entsteht das zweite Halbbild zur gleichen Zeit durch Belichtung der geraden Zeilen. Im nächsten Zyklus werden die Rollen der Bildzeilen einfach getauscht.

Auf diese Weise können auf elektronischen Weg Graubild- oder Farbbildaufnahmen gemacht werden. Für Farbaufnahmen werden je nach Farbmodell entweder einzelne Pixel mit Farbfiltern versehen (1-Chip-Farbkamera) oder drei Chips eingesetzt, vor denen jeweils ein Farbfilter sitzt (3-Chip-Farbkamera). Die 3-Chip-Kamera besitzt eine höhere Auflösung ist aber aufgrund der Aufteilung des Lichts in drei Teilstrahlen weniger empfindlich.

6.4.3.3 CMOS-Kamera

Die lichtempfindlichen Elemente bei einer CMOS-Kamera sind wiederum Fotodioden, deren schwacher Fotostrom über einen großen Widerstand in eine Spannung transformiert wird (Bild 6.19).



Bild 6.19: Aufbau eines lichtempfindlichen Elementes

Dieser Widerstand wird durch einen entsprechend geschalteten MOSFET (*metal oxide semi*conductor field effect transistor) realisiert [Ta 99]. Die CMOS-Technologie macht es möglich, durch entsprechende Be- und Verschaltung von Transistoren andere elektronische Bauelemente wie z.B. Widerstände oder logische Gatter auf engstem Raum zu realisieren. CMOS steht dabei für complementary metal oxide semiconductor und beschreibt eine Halbleitertechnologie, in der p-Transistoren und n-Transistoren komplementär miteinander verschaltet sind. Die weitere "Verdrahtung" zur Adressierung, Digitalisierung usw. kann dann ebenfalls mit dieser Technologie erfolgen. Damit ist eine kostengünstige Fertigung auf Wafern ähnlich der Mikrochipfertigung möglich.

Die lichtempfindlichen Elemente der CMOS-Kamera sind ähnlich der CCD-Kamera matrixförmig angeordnet. Der Pixelabstand beträgt dabei etwa 15 µm. Der Füllfaktor, d.h. die effektiv genutzte Fläche, ist allerdings aufgrund der Schaltung zur Adressierung der Bildelemente gering. Der besondere Vorteil der CMOS-Kamera, die erst seit etwa einem Jahr kommerziell erhältlich ist, liegt darin, daß beim Auftreffen von Licht sofort und kontinuierlich ein Fotostrom fließt, der direkt in ein Spannungssignal umgewandelt wird. Die Bildelemente können somit kontinuierlich und parallel ausgelesen werden. Heutzutage erreichen CMOS-Kameras eine Bildwiederholrate von ca. 1.500 Bildern pro Sekunde.

6.4.3.4 Vergleich von CCD- und CMOS-Kamera

Die Art des Ladungstransports ist das Hauptunterscheidungsmerkmal bei einer CCD- bzw. CMOS-Kamera. Die Vorteile der CMOS-Kamera ergeben sich aufgrund der Unabhängigkeit der einzelnen Bildelemente sowie des größeren Aussteuerbereichs. Das sogenannte Blooming tritt bei diesem Kameratyp nicht auf. Beim Blooming kommt es zu einer Sättigung eines einzelnen Pixels aufgrund zu starker Belichtung. Die überschüssige Ladung fließt bei der CCD-Kamera zu den Nachbarpixeln und verursacht im Bild einen hellen Fleck. Die gesamte Information geht in diesem Bereich verloren. Im Gegensatz dazu werden die Nachbarpixel bei der CMOS-Kamera nicht behindert (Bild 6.20).



Bild 6.20: Vergleich von CCD- und CMOS-Bild (Quelle: Fraunhofer IMS, Abt. SYS1)

In diesem Zusammenhang steht auch die Möglichkeit, mit einer CMOS-Kamera kontrastreiche Bilder von Objekten aufzunehmen, die vor einem hellen Hintergrund stehen. Der zweite Vorteil liegt darin, daß es wesentlich leichter fällt, ein einzelnes Pixel aus der Bildmatrix auszulesen. Bei der CCD-Kamera dagegen ist es schwieriger, aus dem seriellen Signal den Spannungspuls des gewünschten Bildelements zu extrahieren. In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Merkmale von CCD- und CMOS-Kamera zusammenfassend gegenübergestellt.

Merkmal	ССД	CMOS
Zugriff	einzelne Bilder	wahlfrei auf einzelne Pixel
max. Bildrate	25 Bilder pro Sekunde	1.500 Bilder pro Sekunde
Ausgangssignal	analog, neuerdings auch digital	digital
Füllfaktor	je nach Typ bis zu 100%	15%
Signal/Rauschabstand	bei CCD 1 bis 2 Dekaden niedriger als bei CMOS	
Blooming	vorhanden	nicht vorhanden
max. Aussteuerbereich	61 dB	140 dB
Empfindlichkeit	bei CCD ca. 1 Dekade niedriger als bei CMOS	
Energieverbrauch	bei CCD ca. 1 Dekade höher als bei CMOS	
Belichtungssteuerung	manuell	on chip automatisch/manuell
Belichtungszeit	einstellbar	liefert Dauersignal
Darstellung	monochrom, farbig	zur Zeit nur monochrom
Kosten	monochrom: 1.500,00 DM	5.000,00 DM
	farbig: 4.000,00 DM	

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung von CCD- und CMOS-Kamera

Speziell für die Auswertung mehrerer faseroptischer Sensoren ist die CMOS-Kamera aufgrund der oben genannten Eigenschaften prinzipiell besser geeignet. Da bei einem Bündel aus einzelnen Lichtwellenleitern nicht das Gesamtbild interessiert, sondern nur die lichtführenden Faserkerne von Bedeutung sind, ist der schnelle Zugriff darauf nur mit einer CMOS-Kamera möglich. Im Gegensatz dazu prädestinieren Füllfaktor, Rauschabstand farbige Darstellung und nicht zuletzt der Preis die CCD-Kamera. Bei den Versuchen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschrieben werden, sind CCD-Kameras verwendet worden, weil einerseits eine CMOS-Kamera noch nicht zur Verfügung stand, und andererseits die Farbdarstellung ein nicht zu vernachlässigendes Kriterium in der industriellen Prozeßüberwachung ist. Leider lassen sich aus drucktechnischen Gründen die Bilder in dieser Arbeit nicht farbig darstellen. Die Verfahren sowie die Ergebnisse der Untersuchungen sind aber ohne weiteres auf die CMOS-Kamera übertragbar und können unter anderem in bezug auf Geschwindigkeit so noch weiter optimiert werden (vgl. Abschnitt 10).

6.4.4 Auswerte- und Anzeigeeinheit

Als letztes Glied in der Kette fällt der Auswerte- und Anzeigeeinheit die Aufgabe zu, die empfangenen Signale darzustellen. Die elektrischen Signale der Detektoren werden im Falle der CCD-Kamera mit Hilfe einer Bildverarbeitungskarte digitalisiert und in einem Bildspeicher für die weitere Verarbeitung abgelegt. Die CMOS-Kamera liefert direkt digitale Datenströme, die dann ebenfalls zur Weiterverarbeitung genutzt werden können.

Mit einer geeigneten Software ist es von nun an möglich, die Signale in vielfältiger Weise zu kombinieren und darzustellen. Reaktionen auf Intensitäts- und/oder Farbänderungen bezogen auf vorgegebene Grenzwerte sind ebenso möglich wie der Abgleich verschiedenener Sensoren zueinander, um beispielsweise das unterschiedliche Dämpfungsverhalten der Fasern zu korrigieren oder auf Veränderungen der Umgebungsparameter zu reagieren. Letztendlich ist damit eine benutzerfreundliche Darstellung des überwachten Prozesses möglich.

Mit steigender Rechnerleistung und zunehmender Programmvielfalt verschiebt sich die Schwachstelle des Gesamtsystems mehr und mehr in Richtung Meßwertaufnahme. Während früher die Flut der Daten nur unzureichend bewältigt werden konnte, wenn neben der reinen Darstellung noch zusätzliche Operationen ausgeführt werden sollten, so stellt das heutzutage kaum noch ein Problem dar.
7 Kalibrierung inkohärenter Bildleiter

Voraussetzung für die simultane Auswertung mehrerer Lichtwellenleiter ist die korrekte Zuordnung der Ein- und Ausgangsseite des Sensors. Im Falle einzeln angeordneter Lichtschranken erfolgt die Zuordnung durch schlichtes Unterbrechen des Lichtstrahls. Zeilenförmige Sensoren können ebenfalls durch sukzessives Abschatten der einzelnen Lichtwellenleiter oder bei speziellen Prüfaufgaben mittels Schablonen kalibriert werden (vgl. Abschnitt 6.1.2). Flächige faseroptische Sensoren lassen sich prinzipiell genauso zuordnen. Sie bestehen jedoch in der Regel aus wesentlich mehr Fasern, so daß der Zeitaufwand für die Zuordnung erheblich steigt. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß für jede Faser zwei Koordinaten bestimmt werden müssen.

Die schnelle und zuverlässige Kalibrierung von ungeordneten Faserbündeln – man spricht auch von inkohärenten Bündeln – ist Thema dieses Abschnitts.

7.1 Stand der Technik

Für den in Abschnitt 6.1.3 beschriebenen faseroptischen Abstandssensor ist ein mechanisches Verfahren zur Kalibrierung des ungeordneten Faserbündels entwickelt worden, das jedoch wesentliche Mängel aufweist. Der Versuchsaufbau, der Ablauf der Kalibrierung und die Defizite dieses Verfahrens werden im folgenden beschrieben.

7.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Bild 7.1 schematisch dargestellt. Die an der Spitze des Sensors zentrisch gehaltene Monomode-Faser zur Führung des Beleuchtungslichts wird am Ende des Faserbündels seitlich herausgeführt. Sie ist für die Bildübertragung ohne Belang und deshalb in den Prinzipskizzen nicht weiter mit dargestellt.



Bild 7.1: Versuchsaufbau des mechanischen Kalibrierverfahrens

Zentrales Element ist das ungeordnete Faserbündel mit etwa 8.500 Lichtwellenleitern. Als Lichtquelle dient eine herkömmliche Halogenlampe, deren Strahlcharakteristik durch eine Mattscheibe weitestgehend homogenisiert wird. Zwischen Lichtquelle und Sensorspitze sitzt eine computergesteuerte Positioniereinheit, deren Achsen über Wegmeßsysteme bis auf einen Mikrometer genau positioniert werden können. An dieser Positioniereinheit sind zwei senk-recht zueinander stehende scharfe Kanten befestigt, die als Blenden dienen. Das Ende des Faserbündels ist auf einem Mikrostelltisch befestigt. Die Lichtaustrittsfläche wird mit einem Zoom-Objektiv auf den CCD-Chip einer herkömmlichen Kamera abgebildet. Dabei muß die Abbildung bezüglich Vergrößerung und Auflösung so realisiert sein, daß die einzelnen Fasern des Bündels unterschieden werden können. Die Signale der Kamera werden von einer Bildverarbeitungskarte digitalisiert und stehen zur weiteren Verarbeitung in einem Computer zur Verfügung. Derselbe Computer steuert auch die Positioniereinheit.

7.1.2 Ablauf der Kalibrierung

Zu Beginn der Kalibrierung werden die Koordinaten der Fasermittelpunkte an der Ausgangsseite des Bündels bestimmt. Dazu wird die Eingangsseite vollständig ausgeleuchtet, und ein Bild der Ausgangsseite aufgenommen. Bild 7.2a zeigt einen entsprechenden Ausschnitt des Faserbündels.



Bild 7.2: Bilderfolge zur Bestimmung der Koordinaten der Ausgangsseite

Mit einem Schwellwertverfahren werden nun die hell erleuchteten, Licht führenden Faserkerne vom Hintergrund separiert (Bild 7.2b). Dabei ist zu beachten, daß der Schwellwert so eingestellt ist, daß die Leuchtflecke im Bild nicht zusammenhängen. Sollte die Trennung durch Verändern des Schwellwertes nicht gelingen, muß die Beleuchtung variiert werden. Im nächsten Schritt werden die separierten Leuchtflecke auf einen Punkt geschrumpft (Bild 7.2c) [EiKe 96]. Anschließend werden diese Punkte numeriert und ihre Koordinaten auf dem CCD-Chip in einer Tabelle abgespeichert. Zur visuellen Kontrolle, ob diese Punkte mit den Mittelpunkten der einzelnen Fasern weitestgehend übereinstimmen, wird vom Originalbild das Punkt-Bild abgezogen (Bild 7.2d). Im Bedarfsfall optimiert ein zusätzlicher Algorithmus die Lage der Mittelpunkte, indem er ausgehend vom Startwert aus der Tabelle den hellsten Punkt eines jeden Leuchtflecks sucht und diesen dann als neuen Mittelpunkt in der Tabelle ablegt. Damit sind die Koordinaten auf der Ausgangsseite (x_{Ausgang} bzw. y_{Ausgang}) des Faserbündels festgelegt. Jetzt müssen die Koordinaten auf der Eingangsseite bestimmt werden. Dazu sind zunächst einige Grundeinstellungen vorzunehmen. Start- und Stopposition sowie die Schrittweite der Blenden werden eingestellt. Die Schrittweite muß so gewählt werden, daß pro Schritt maximal die Hälfte eines Lichtwellenleiters abgeschattet wird. Zusätzlich ist durch Veränderung des Abstandes zwischen Blende und Stirnseite des Bündels sicherzustellen, daß die Kante der Blende scharf abgebildet wird. Sind die Grundeinstellungen erfolgt, werden die Blenden nacheinander schrittweise verfahren. Erst nach der im folgenden beschriebenen Prozedur kann allerdings festgestellt werden, ob die gewählten Einstellungen korrekt waren. Eventuell muß der komplette Vorgang mit optimierten Einstellungen wiederholt werden.

Zuerst wird die Blende zur Bestimmung der ersten Koordinate so lange bewegt, bis das ganze Bündel abgedeckt ist. Dann wird das Ganze mit der zur ersten senkrecht stehenden Blende wiederholt. Nach jedem Verfahrschritt wird ein Bild aufgenommen. Dabei werden die Intensitäten der Mittelpunkte in Abhängigkeit von der Position der jeweiligen Blende abgespeichert, so daß am Ende für jede Faser zwei Intensitätsverläufe in Abhängigkeit der Blendenposition vorliegen (Bild 7.3).



Bild 7.3: Charakteristischer Intensitätsverlauf einer Faser für eine Richtung

Damit ist der mechanische Teil der Kalibrierung abgeschlossen. Im folgenden werden die Intensitätsverläufe rechnergestützt ausgewertet, um daraus eine Koordinate zu bestimmen. Dazu werden zunächst zwei Mittelwerte gebildet. Der erste Mittelwert wird aus den Intensitätsmaxima, der zweite aus den Intensitätsminima gewonnen. Dazu werden jeweils die ersten und die letzten fünf Werte herangezogen. Das arithmetische Mittel dieser beiden Mittelwerte wird als Schwellwert zur Bestimmung der Position verwendet (Bild 7.4).



Bild 7.4: Positionsbestimmung durch Mittelwertbildung

Die ermittelte Koordinate ($x_{Eingang}$ bzw. $y_{Eingang}$) wird entsprechend der laufenden Nummer der Faser in der Tabelle abgespeichert. So verfährt man mit allen Intensitätsverläufen und erhält abschließend in Form einer Tabelle die korrekte Zuordnung der Fasern.

Zur Verbesserung der Bildqualität wird abschließend ein Weißabgleich durchgeführt. Damit kann die individuelle Dämpfung der einzelnen Lichtwellenleiter korrigiert werden. Beim Weißabgleich wird das Bündel wiederum vollständig ausgeleuchtet. Die Intensitäten der Fasern werden detektiert. Aus den ermittelten Intensitäten wird für jede Faser ein individueller Faktor v errechnet, der die Helligkeit aller Fasern auf einen gemeinsamen Level zieht. Die jeweiligen Verstärkungsfaktoren werden ebenfalls mit in der Zuordnungstabelle abgespeichert. Ein Ausschnitt der Zuordnungstabelle ist in Tabelle 7.1 dargestellt:

Nummer	X _{Eingang}	YEingang	X _{Ausgang}	Y Ausgang	Faktor v
1	347	535	14	15	1,174
2	298	177	20	16	1,036
2.001	127	18	123	217	1,000
2.002	432	210	128	217	1,287
8.500	13	426	499	535	1,169

Tabelle 7.1: Ausschnitt aus der Zuordnungstabelle

Damit ist die Kalibrierung beendet. Mithilfe der Zuordnungstabelle können nun auch Bilder über ein inkohärentes Faserbündel übertragen werden (Bild 7.5).



Bild 7.5: Über das inkohärente Faserbündel übertragene Information und daraus rekonstruiertes Bild einer Münze

Zu beachten ist, daß im rekonstruierten Bild natürlich wieder die Stege sowie die Aussparung für die Monomode-Faser auftauchen, da hier ja eingangsseitig auch keine Fasern liegen.

7.1.3 Defizite des mechanischen Kalibrierverfahrens

Der Versuchsaufbau und das beschriebene Verfahren weisen erhebliche Mängel auf, die während des Kalibrierprozesses alle Einfluß auf die Qualität der Zuordnung und damit auch auf die Qualität der resultierenden Bilder nehmen.

7.1.3.1 Defizite des Versuchsaufbaus

Die größten Schwachstellen des Versuchsaufbaus liegen in der Positioniereinheit und der Kopplung von Faserbündel und CCD-Kamera.

Die Lineartische der Positioniereinheit sind so miteinander kombiniert, daß ihre Achsen ein kartesisches Koordinatensystem aufspannen. Damit können die Blenden frei verfahren werden. Trotz der Regelung durch Glasmaßstäbe zeigte sich, daß die Schrittweite nicht konstant bleibt. Das kann zum einen auf Verschmutzungen in den Führungen der Lineartische zum anderen auf Spiel innerhalb der Führungen zurückgeführt werden. Letztgenannter Punkt tritt besonders dann in Erscheinung, wenn die Achsen in die Nähe des Anschlags gefahren werden, und sich durch die Aufbauten die Gewichtsverteilung über dem Tisch verändert.

Die Blenden sind durch Rasierklingen realisiert, deren Kanten senkrecht zueinander eingespannt werden. Die Orthogonalität der Kanten ist dabei genauso fraglich wie die Geradheit der einzelnen Kanten selbst.

Ein weiteres Problem des Versuchsaufbaus ist die Dejustage, d.h. die nicht gewünschte Verschiebung einzelner Teile des Versuchsaufbaus untereinander. Auf der Kameraseite wird das Faserbündel auf einem 5-Achs-Mikrostelltisch befestigt, damit es vor dem Objektiv der starr angebrachten CCD-Kamera positioniert werden kann. Eine Ausrichtung auf die optische Achse des Objektivs erweist sich bereits als schwierig, da jede Verkippung zu Ungenauigkeiten führt. Leichte Erschütterungen der Anordnung während der Kalibrierung sind in der Lage eine Zuordnung zunichte zu machen. In Extremfällen verursacht die Erwärmung der Kamera schon eine Dejustage.

7.1.3.2 Defizite des Verfahrens

Ein großes Problem bereitet schon die Grundeinstellung der Versuchsanordnung. Für den Bediener der Vorrichtung gestalten sich diese Einstellungen als äußerst schwierig, da er kein richtiges Bild sieht, sondern nur Veränderungen in der Helligkeit einzelner Fasern erkennen kann. Es gehört viel Erfahrung und Fingerspitzengefühl dazu, diese Voreinstellungen, die ganz wesentlich die Qualität der Kalibrierung beeinflussen, vorzunehmen.

Problematisch ist außerdem, die extreme Dauer des Kalibrierprozesses. Um ein Faserbündel mit 5 mm Durchmesser und etwa 8.500 Fasern sukzessive abzuschatten, sind etwa 300 Verfahrschritte notwendig. Für beide Richtungen ergeben das 600 Schritte. Das Anfahren der Positionen sowie das Abspeichern der gesamten Bildinformation nach jedem Schritt dauert insgesamt etwa 90 Minuten. In dieser Zeit ist es nahezu unmöglich, sämtliche störende Einflüsse abzuschirmen. Aus diesem Grund ist eine Kalibrierung mit diesem Verfahren meistens nachts durchgeführt worden. In industrieller Umgebung wäre sie nur mit hohem Aufwand möglich. Die nachfolgende Auswertung der 17.000 Intensitätsverläufe – für jede Faser sind zwei Verläufe heranzuziehen – dauert nochmals 60 Minuten. Wird die Zeit für die Grundeinstellung hinzu gerechnet, so benötigt die Kalibrierung bei erfahrenem Personal etwa vier Stunden.

Insgesamt erweist sich dieses Verfahren somit als nicht ausreichend stabil, kaum reproduzierbar und aufgrund der Dauer als nicht wirtschaftlich. Im Hinblick auf die Nutzung ungeordneter Faserbündel zur Bildübertragung verhindert dieses Kalibrierverfahren eine kostengünstige Umsetzung. Jedoch ist nur mit ungeordneten Faserbündeln eine Weiterentwicklung hinsichtlich Flexibilität und Funktionalität im Bereich der Sensorik und der Prozeßüberwachung zu erreichen.

Der Vollständigkeit halber soll ein Verfahren, das unabhängig von dem im nächsten Abschnitt beschriebenen optoelektronischen Kalibrierverfahren in England entwickelt wurde, nicht unerwähnt bleiben. Bild 7.6 und Bild 7.7 zeigen den Versuchsaufbau und die zugehörigen Ergebnisse der Bildrekonstruktion [De 96].



Bild 7.6: System zur Bildrekonstruktion

Das Faserbündel wurde mit speziellen Testbildern kalibriert. Trotz der sehr großen Anzahl von ca. 30.000 Bildpunkten wird aber nur eine sehr schlechte Bildqualität mit vielen Ausreißern erreicht.



3 cm

Bild 7.7: Kamera- und Ergebnisbild mit vielen Ausreißern (weiße Flecken)

7.2 Optoelektronisches Kalibrierverfahren

Um das in Abschnitt 6.3 vorgestellte Konzept des multifunktionalen Bildleiters verwirklichen zu können, ist neben der in Abschnitt 6.4 beschriebenen Entwicklung der Einzelkomponenten die Kalibrierung des inkohärenten Faserbündels von entscheidender Bedeutung.

Ein wichtiges Ziel im Rahmen dieser Arbeit war es deshalb, die Defizite des mechanischen Kalibrierverfahrens weitestgehend zu beseitigen. Oberste Priorität hatte dabei die drastische Beschleunigung des Verfahrens bei gleichbleibender bzw. besserer Reproduzierbarkeit und damit Qualität der Zuordnung. Hinzu kommt, daß das neue Verfahren auch an den um den Faktor fünf dünneren multifunktionalen Bildleiter angepaßt werden mußte, der im Gegensatz zu dem Reflexkopplersensor zusätzlich noch mit einer Frontoptik ausgestattet ist. Nebenbei sollte die Bedienbarkeit des Systems wesentlich vereinfacht werden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird der Versuchsaufbau des neu entwickelten Verfahrens sowie dessen Ablauf beschrieben. Verbesserungen gegenüber dem Stand der Technik und weitere Optimierungsmöglichkeiten werden diskutiert.

7.2.1 Versuchsaufbau

Die wesentliche Änderung des Versuchsaufbaus besteht in der Substitution der Positioniereinheit durch eine Flüssigkristallanzeige (engl. LCD für *Liquid Crystal Display*). Mit diesen Displays, die auch in Projektoren eingesetzt werden, ist neben einer Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten auch die Darstellung von vertikalen und horizontalen Linien möglich. Die Gestaltung bezüglich Linienbreite und -position ist dabei innerhalb der Systemgrenzen frei. Die Ansteuerung erfolgt computergesteuert über eine Interface-Karte. Die Linien werden ohne jegliche mechanische Bewegung, verschleißfrei und absolut reproduzierbar in Bruchteilen von Sekunden auf dem Display dargestellt.

Das im Versuch verwendete LC-Display ist in der Lage, jeweils 640 Linien in vertikaler und horizontaler Richtung zu projizieren. Die minimale Linienbreite beträgt 90 µm.

Der Versuchsaufbau ist in Bild 7.8 schematisch dargestellt.



Bild 7.8: Versuchsaufbau mit LC-Display

Bis auf die hinterleuchtete Flüssigkristallanzeige ist die Versuchsanordnung zunächst nicht verändert worden. Im Hinblick auf die Kalibrierung des multifunktionalen Bildleiters sitzt zwischen der Eingangsseite des Faserbündels und dem Display ein Objektiv, welches das Bild der Flüssigkristallanzeige auf die Stirnfläche des Sensors abbildet. Die Steuerung des Displays und die Verarbeitung der Bilddaten erfolgt wiederum über einen einzigen Rechner.

7.2.2 Ablauf der optoelektronischen Kalibrierung

Die Detektion der Fasern an der Ausgangsseite des Bündels ist relativ stabil und bedarf eigentlich nur einer programmiertechnischen Optimierung hinsichtlich Trennung und Erkennung der Fasermittelpunkte durch schnellere Software. Die wesentlichen Änderungen entstehen durch die Substitution der Verfahreinheit.

Prinzipiell wäre es bei Nutzung des LC-Displays nicht notwendig, Änderungen im Ablauf der Kalibrierung vorzunehmen. Die sukzessive Abschattung der einzelnen Fasern des Bündels kann auch durch schrittweises verbreitern einer Linie erreicht werden. Jedoch hätte man dadurch nur eine zeitkritische Komponente des Verfahrens kompensiert. Die zweite zeitkritische Komponente, die Auswertung der Intensitätsverläufe, bliebe bestehen. Auch die Voreinstellungen würden sich nicht sehr vereinfachen. Der neue Ansatz macht sich den Vorteil der freien Programmierbarkeit des Displays zunutze. Zunächst werden eine Reihe von Bildfolgen projiziert, welche die Voreinstellung des Systems erleichtern (Bild 7.9).

Vertikale und horizontale seitliche Begrenzungen ermöglichen dem Bediener die Positionierung des Faserbündels im Zentrum des Displays. Eine scharfe Abbildung ist dann gegeben, wenn die abwechselnde Projektion komplementärer Linienmuster die größtmöglichen Veränderungen im Kamerabild hervorruft. Außerdem wird ein Hell- und Dunkelabgleich vorgenommen, um die Maximum- und Minimumintensität jeder Faser zu erhalten. Aus dem arithmetischen Mittel wird wiederum für jede Faser der Schwellwert ermittelt, mit dem unterschieden werden kann, ob sie beleuchtet wird oder nicht. Für die Bestimmung des Verstärkungsfaktors sind diese Werte ebenfalls erforderlich. Damit ist die Voreinstellung abgeschlossen. Nun geht es darum, die Koordinaten der Fasern auf der Eingangsseite zu bestimmen.



Bild 7.9: Bildfolge zur Grundeinstellung

Der neu gewählte Ansatz zur Kalibrierung basiert auf der Nutzung eines Binär-Codes. Die Position einer Faser wird quasi durch Intervallschachtelung stetig eingegrenzt. Mit einer ersten Bildsequenz wird zunächst nur eine Koordinate des Punktepaares gefunden. Die zweite Bildsequenz besteht aus identischen Bildern, die jedoch um 90° gedreht sind, um die zweite Koordinate zu ermitteln.

Das erste Bild, das vom LC-Display generiert wird, besteht aus einer rechten undurchsichtigen, dunklen Hälfte und einer linken durchsichtigen, hellen Hälfte (Bild 7.10).



Bild 7.10: Erstes Bild der Sequenz

Alle Fasern, die nun noch im Kamerabild erscheinen und deren Helligkeit über dem ermittelten Schwellwert liegen, befinden sich auf der Eingangsseite in der linken Hälfte des Bündels. Die Positionen, die abgedunkelt sind liegen entsprechend in der rechten Hälfte. Der Intensitätswert und damit die erste Zuordnung wird für jede Faser abgespeichert. Im nächsten Bild der Sequenz wird die Einteilung halbiert (Bild 7.11).



Bild 7.11: Zweites Bild der Sequenz

Die oben beschriebene Prozedur wird wiederholt, und die Position der einzelnen Fasern kann weiter eingegrenzt werden.

Diese Schachtelung wird so lange fortgesetzt, bis die Auflösungsgrenze des Faserbündels erreicht und damit eine weitere Eingrenzung nicht mehr möglich ist.

Zur Verdeutlichung zeigt Bild 7.12 die Bildsequenz und die resultierenden Intensitätsverläufe für zwei verschiedene Positionen der x-Koordinate.



Bild 7.12: Bildsequenz und resultierender Binär-Code für zwei unterschiedliche Positionen

Nach Ablauf der zweiten um 90° gedrehten Bildsequenz sind die Positionen der Fasern an der Eingangsseite bekannt. Durch die Verknüpfung mit den Koordinaten des Ausgangs wird die Zuordnungstabelle vervollständigt. Damit ergibt sich die Möglichkeit der Bildübertragung.

7.2.3 Unterschiede gegenüber dem Stand der Technik

Der größte Unterschied besteht in der wesentlich kürzeren Dauer der gesamten Kalibrierung. Da anstelle von 300 Aufnahmen pro Einzelkoordinate nur noch acht Streifenbilder ausgewertet werden müssen, ergibt sich eine Beschleunigung des Prozesses von mehreren Stunden auf wenige Minuten. Infolge dieser Verkürzung verringert sich auch der Einfluß der Umgebung, da es einfacher ist, einen Zustand nur für wenige Minuten aufrecht zu erhalten, als ihn über mehrere Stunden zu garantieren. Selbst wenn die Kalibrierung durch Erschütterungen oder ähnliches gestört wird, ist es ein Leichtes, den Vorgang zu wiederholen. Sowohl die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses als auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist somit drastisch verbessert worden. Damit ist das wichtigste Ziel scheinbar erreicht.

Einschränkend muß gesagt werden, daß die Zuordnung zunächst nicht hundertprozentig funktionierte. Ein zu Kontrollzwecken erstelltes Programm dient der einfachen Visualisierung der Zuordnung und verdeutlicht, daß es sogar sehr viele Ausreißer in Form von Lichtpunkten am äußeren und unteren Rand des rekonstruierten Bildes gibt (Bild 7.13).

Die Ursache für diese Fehlzuordnungen läßt sich auf zwei Effekte zurückführen. Zum einen wird es an der Grenze zwischen hellen und dunklen Linien sowie mit zunehmender Liniendichte immer schwieriger, eine eindeutige Entscheidung zwischen hell und dunkel zu treffen. Zum anderen können die groben Ausreißer nur aus einer Einordnung in einen falschen Block resultieren. Es ist denkbar, daß zuweilen ein Lichtwellenleiter genau die Trennlinie zwischen einem hellen und einem dunklen Bereich betrachtet. In diesem Fall kann dann eine minimale Änderung im Grauwert über die Zuordnung entscheiden.



Bild 7.13: Rekonstruiertes Bild mit Ausreißern in Form von hellen Punkten außerhalb des Bündels

Anhand eines Beispiels läßt sich der Effekt der fälschlichen Zuordnung erklären. Wird eine Faser ein einziges Mal als hell anstatt als dunkel erkannt, so kann dies gravierende Auswirkungen haben. Am größten ist der Einfluß, wenn der Fehler direkt beim ersten Bild der Sequenz auftritt. Dann wird nämlich die Lage auf der betreffenden Koordinatenachse um die Hälfte des möglichen Aufenthaltes falsch bestimmt (Bild 7.14).

Bild 1	1 Bild 2 Bild 3		distaler Aufenthaltsbereich	
			rechtes Achtel	
			zweites Achtel von rechts	
			drittes Achtel von rechts	
			viertes Achtel von rechts	
			fünftes Achtel von rechts	
			sechstes Achtel von rechts	
			siebtes Achtel von rechts	
			linkes Achtel	

Bild 7.14: Auswirkungen der fehlerhaften Zuordnung

In der Möglichkeit derartiger Fehlzuordnungen liegt das eigentliche Problem des Algorithmus. Der zugrundeliegende direkte Binär-Code weist keine besondere Fehlersicherheit auf und muß deshalb ersetzt werden.

7.2.4 Optimierung des optoelektronischen Kalibrierverfahrens

Nachdem die Dauer der Kalibrierung in einem ersten Ansatz erfolgreich reduziert worden ist, kommt es nun im Rahmen einer Optimierung darauf an, die Fehlzuordnungen durch Verwendung einer besser geeigneten Bildsequenz zu vermeiden. Diese Verbesserung wird durch die Nutzung des Gray-Codes erreicht.

Der Gray-Code zeichnet sich durch eine große inhärente Fehlersicherheit aus [BaGo 82]. Für die Zuordnung von Lichtwellenleitern hat das zur Folge, daß bei einer falschen Erkennung der Helligkeit nur ein minimaler Kalibrierfehler hervorgerufen wird. Dies ist nur möglich, wenn die Codes, welche zu zwei benachbarten Koordinatenpaaren gehören, sich nur in einer Stelle unterscheiden. Ein Vergleich von direktem Binär-Code und Gray-Code ist in Tabelle 7.2 dargestellt.



Tabelle 7.2: Vergleich von Binär- und Gray-Code

Die aus der obigen Zählung des Gray-Codes resultierende Systematik des Testbildaufbaus geht aus der folgenden Bildsequenz hervor (Bild 7.15).



Bild 7.15: Systematik des Gray-Codes

Nach dem ersten Testbild der Sequenz wird die Zuordnung jedes Lichtwellenleiters zu hell oder dunkel entschieden. Bei allen dunklen Fasern wird der mögliche Aufenthaltsbereich auf die rechte Hälfte, bei den hellen auf die linke Hälfte reduziert.

Im zweiten Testbild wird für dunkle Fasern, die im ersten Bild ebenfalls nicht beleuchtet waren, der Aufenthaltsbereich auf die linke Hälfte des Vorigen beschränkt. Für helle Fasern, die vorher dunkel waren, reduziert sich der Bereich dagegen auf die rechte Hälfte. Umgekehrt gilt entsprechendes. Im dritten Bild gelten für die linke Hälfte die Unterscheidungsregeln des zweiten Testbildes, wie man durch Vergleich mit Bild 7.15 feststellen kann. In der rechten Hälfte muß jeweils die Zuordnung umgekehrt erfolgen. Die Frage, ob im vorletzten Bild eine Zuordnung nach rechts oder links erfolgte, dient der Fallunterscheidung.

Die Einordnung der Lichtwellenleiter ist offensichtlich nicht ganz so trivial wie beim direkten Binär-Code. Um dennoch die Kalibrierung rationell und sicher zu gestalten, muß eine allgemeingültige Abfrage die Zuordnung für jedes Testbild ermöglichen. Nur so kann in einem Programm eine Schleife die Auswertung vornehmen.

Aus der für das dritte Bild gefundenen Abfrage läßt sich die verallgemeinerte Form herleiten. Zur Unterscheidung müssen drei Fragen beantwortet werden:

- 1. Ist die Faser beim aktuellen Bild hell oder dunkel?
- 2. War sie beim vorhergehenden Bild hell oder dunkel?
- 3. War im letzten Bild der mögliche Aufenthaltsbereich auf die rechte oder linke Hälfte reduziert worden?

Unabhängig von der Nummer des aktuell auszuwertenden Bildes kann damit stets die korrekte Einordnung erfolgen. So steht zum Beispiel fest, daß immer dann, wenn eine Faser hell ist, hell war und nach rechts eingeordnet wurde, der mögliche Aufenthaltsbereich auf die rechte Hälfte reduziert werden muß.

Um das erste Testbild auswerten zu können, müssen Startbedingungen gesetzt werden, da schließlich keine Informationen bezüglich des letzten Bildes verfügbar sind. Vor Beginn der Testbildsequenz setzt man deshalb voraus, daß in einem fiktiven Vorgängerbild alle Lichtwellenleiter hell waren und nach links zugeordnet wurden. Dieser Schritt kann überprüft werden, indem man sich das Schema der Testbilder um ein Vorgängerbild erweitert denkt.

Im Gegensatz zum einfachen Binär-Code erfolgt die Zuordnung nicht anhand einer einzigen Bedingung (hell oder dunkel). Es müssen statt dessen die drei oben aufgezählten Bedingungen überprüft werden. Es sind anstelle der zwei Fälle nunmehr 2^3 =8 Fälle möglich. Die Auswertelogik wird dementsprechend komplexer.

Es ist hervorzuheben, daß jeder Lichtwellenleiter nur bei einem einzigen Testbild Gefahr läuft, durch äußere Einflüsse falsch zugeordnet zu werden. Dies ist dann der Fall, wenn er gerade die Kante zweier Streifen betrachtet. Im Falle des einfachen Binär-Codes besteht diese Möglichkeit für manche Fasern dagegen mit jedem Bild von neuem und kann mitunter mehrfach zu falschen Einordnungen führen. Für den Gray-Code ist festzustellen, daß er folglich unter realistischen Bedingungen allenfalls die Fehlzuordnung um nur ein einziges Inkrement, d.h. einen Koordinatenwert zuläßt.

Der Ablauf des Kalibrierprogramms ist in Bild 7.16 abschließend nochmals schematisch dargestellt.



Bild 7.16: Ablauf des Kalibrierprogramms

7.3 Ergebnisse des optoelektronischen Kalibrierverfahrens

Die komplexere Auswertung des Gray-Codes bedingt eine etwas längere Dauer des Zuordnungsprozesses. Man bewegt sich aber weiterhin im Bereich weniger Minuten und ist damit immer noch wesentlich schneller als im mechanischen Kalibrierverfahren. Die Nutzung schnellerer Hard- und Software birgt noch zusätzliches Potential für eine weitere Beschleunigung. Durch die Verwendung der optimierten Bildsequenz liegt die Sicherheit der Zuordnung nun bei nahezu 100 Prozent. Wie das nachfolgende Bild zeigt, ist kein Ausreißer im Sinne einer Fehlzuordnung zu bemerken (Bild 7.17). Besonders der Vergleich mit Bild 7.13 zeigt den Fortschritt durch den Einsatz des Gray-Codes.



Bild 7.17: Rekonstruiertes Bild auf der Basis der optimierten Kalibrierung

Die Benutzerfreundlichkeit der Anordnung ist ebenfalls stark verbessert worden. Die Software führt den Anwender durch die einzelnen Schritte, die im Rahmen der Voreinstellungen noch manuell auszuführen sind. Die vormals erforderlichen Kenntnisse werden vom Bediener des Systems nun nicht mehr verlangt. Nach den Grundeinstellungen läuft der Prozeß automatisch, und direkt nach der Kalibrierung wird durch ein Kontrollbild die Qualität der Zuordnung dargestellt.

7.4 Adaption an den multifunktionalen Bildleiter

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt das Verfahren zur Kalibrierung inkohärenter Faserbündel an sich bezüglich Geschwindigkeit und Reproduzierbarkeit optimiert worden ist, besteht nun noch die Notwendigkeit, es an die Forderungen des multifunktionalen Bildleiters anzupassen. Diese Adaption bezieht sich zum einen auf Änderungen hinsichtlich des Laboraufbaus sowie des Verfahrens, zum anderen aber auch auf die Kopplung von Bildleiter und Detektor. Weiterhin soll durch einen entsprechenden Algorithmus die Darstellung der Bilder verbessert werden, um sie für die weitere Bildverarbeitung zugänglich zu machen.

Da der eigentliche multifunktionale Bildleiter als fertiges System noch nicht zur Verfügung stand, sind Versuche mit einem hinsichtlich Durchmesser und Faseranzahl vergleichbaren Miniatur-Endoskop durchgeführt worden. Dieses Endoskop hat einen Durchmesser von 0,8 mm, es besitzt 6.000 Bildpunkte, und der Öffnungswinkel des Objektivs beträgt insgesamt 60°.

7.4.1 Adaption des Kalibrierverfahrens

Das Verfahren der Kalibrierung ist in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich beschrieben worden. Jedoch war es bei dem dabei verwendeten Faserbündel kein Problem, das LC-Display mit Hilfe eines herkömmlichen Objektivs auf die Stirnseite des Bündels abzubilden, um so die einzelnen Fasern abzuschatten.

Die Schwierigkeit besteht nun darin, das Display unter Berücksichtigung der schon montierten Mikrolinse auf den Bildleiter abzubilden. Dabei ist auch darauf zu achten, daß der gesamte Aufbau der Kalibrierstation nicht zu groß wird, um Intensitätsverluste so gering wie möglich zu halten.

Durch die schon vorhandene Mikrolinse wird es erforderlich, daß das Bild des Displays nicht nur um einen gewissen Faktor verkleinert, sondern auch noch reell sein muß. Letzter Punkt kann nur unter Verwendung einer Mattscheibe oder mit Hilfe eines Linsensystems erreicht werden.

Mit einem herkömmlichen Kameraobjektiv oder einer einzelnen Linse ist es bei entsprechend gewählten Abständen ohne weiteres möglich, den erforderlichen Verkleinerungsfaktor von



etwa acht zu realisieren. Ein erster Ansatz bestand also darin, das Bild mit einer Mattscheibe einzufangen und mit dem Endoskop von der anderen Seite zu betrachten (Bild 7.18).

Bild 7.18: Objektiv in Kombination mit einer Mattscheibe

Bei diesem Lösungsansatz treten drei wesentliche Probleme auf, die eine Kalibrierung unmöglich machen. Der Abstand zwischen Display und Objektiv sowie die Apertur des Objektivs verhindern eine vollständige Ausleuchtung des Bildleiters. Zusätzlich schluckt die Mattscheibe noch viel Licht. Weiterhin erlaubt die Struktur der Mattscheibe keine absolut scharfe Abbildung der projizierten Linien.

Die einzige verbleibende Möglichkeit liegt in der Verwendung eines Linsensystems. In der entsprechenden Literatur zur technischen Optik findet man im Kepler-Fernrohr schnell ein optisches System mit den notwendigen Eigenschaften (Bild 7.19)[Sc 90].



Bild 7.19: Strahlengang des Kepler-Fernrohrs

Erste Tests mit einem Fernglas 8x20 bestätigten die Annahme, daß auf diese Weise das LC-Display ausreichend verkleinert und mit genügend Kontrast abgebildet werden konnte. 8x20 bedeutet eine achtfache Verkleinerung bei 20 mm Objektivdurchmesser. Als Zwischenschritt wurde ein lichtstärkeres Fernglas mit stärkerer Verkleinerung verwendet (10x40), bevor letztendlich die besten Ergebnisse mit einem Zielfernrohr (3-12x50) erzielt wurden. Das Fernrohr ist aufgrund des großen Objektivdurchmessers von 50 mm sehr lichtstark, so daß nun eine normale Halogenlampe ausreicht, um die Anordnung zu beleuchten. Ein weiterer Vorteil liegt in der variabel einstellbaren Verkleinerung von drei- bis zwölffach. Damit besteht die Möglichkeit, die Bildgröße optimal anzupassen und somit auch die unterschiedlichsten Öffnungswinkel der Mikroobjektive zu bedienen.

Zielfernrohre sind in der Regel so ausgelegt, daß das Auge im Gegensatz zum Fernglas nicht direkt hinter dem Okular zu liegen kommt. Eine zusätzliche Optik in Form eines Mikroskopobjektivs ist in Kombination mit einer Halterung für das Endoskop so angebracht, daß eine optimale Positionierung der Einzelsysteme zueinander gewährleistet ist. Bild 7.20 zeigt den kompletten Aufbau zur Kalibrierung von Miniatur-Endoskopen.



Bild 7.20: Anordnung zur Kalibrierung von Miniatur-Endoskopen

Die Änderungen, die im Aufbau gemacht wurden, erfordern einige Änderungen in der Softwareimplementierung speziell in der Schwellwertberechnung. Der Schwellwert wurde bisher für jede Faser nur einmal aus dem Mittelwert der Intensitäten gebildet, die bei abgedunkeltem und durchscheinendem Display aufgenommen werden (vgl. Abschnitt 7.2.2).

Nun ist es aber oft so, daß man sich bei der Benutzung eines optischen Systems weniger für dessen einzelne Abbildungsfehler als für die daraus resultierende gesamte Abbildungsleistung interessiert. Die Modulation K, die gleichzusetzen ist mit dem Kontrast, ist definiert als:

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$
Gl. 7.1

Bei völliger Abschattung ist $L_{min}=0$ und damit K=1. Eine gleichmäßig durchleuchte Fläche ergibt K=0. Wird das Objekt mit der Modulation K durch ein optisches System abgebildet, so weist das Bild eine Modulation K'<K auf, da durch Beugung und Abbildungsfehler aber auch durch Streulicht eine Kontrastminderung eintritt.



Bild 7.21: Leuchtdichteverteilung an verschiedenen Spalten

Bild 7.21a zeigt einen schmalen Spalt, Bild 7.21b seine Leuchtdichteverteilung. Die Abbildung dieses Spaltes ergibt in der Bildebene eine Beleuchtungsstärkeverteilung nach Bild 7.21c. Es fällt auf, daß auch Licht in dem Spalt benachbarte Region gelangt. Die Bilder 7.21d-f zeigen entsprechend die Abbildung eines Rechteckgitters mit kontinuierlich zunehmender Ortsfrequenz, die zu abnehmender Modulation K^{c} führt. Diese Untersuchung zeigt, daß im Fall der Kalibrierung eine adaptive Einstellung des Schwellwertes notwendig ist. Anstatt den Schwellwert zu Beginn des Kalibrierprozesses einmal zu ermitteln und festzuhalten, wird nun nach jeder Projektion eines Streifenmusters ein neuer Schwellwert berechnet. Diese Methode hat eine zusätzliche Sicherheit der Zuordnung und damit eine bessere Bildqualität zur Folge.

Mit dieser Anordnung und den softwaretechnischen Änderungen ist es nunmehr möglich, kleinste Endoskope mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln schnell und sicher zu kalibrieren.

Ein interessanter Nebeneffekt der Kalibrierung, der während dieser Untersuchungen beobachtet wurde, besteht in der Korrektur der optischen Verzeichnung des Endoskops. Die starke kissenförmige Verzeichnung, die hauptsächlich auf die Fehler der Mikrooptik zurückzuführen sind, wird auf die Abbildungsfehler der hochkorrigierten Verkleinerungsoptik reduziert.

7.4.2 Kopplung von Faserbündel und Detektor

Dem Verbindungsstück von Faserbündel und Detektor kommt eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zu. Bei der Beschreibung des mechanischen Kalibrierverfahrens ist diese Verbindung als weitere Fehlerquelle identifiziert worden (vgl. Abschnitt 7.1.3.1).

Auf der einen Seite muß sichergestellt werden, daß die einzelnen Lichtwellenleiter eines Bündels immer wieder von denselben lichtempfindlichen Elementen des Detektors erfaßt werden, will man nicht ständig die Zuordnung neu festlegen. Auf der anderen Seite erfordern Wartungs- und Reparaturarbeiten eine Trennung von Detektor und Faserbündel. Diese beiden Anforderungen an das Verbindungsstück stehen im Gegensatz zueinander, denn Einfachheit bei der Handhabung und präzises Positionieren in allen Freiheitsgraden lassen sich kostengünstig nur sehr schwierig realisieren. Zu den kritischsten Veränderungen der Position gehören die Verdrehung und die Verkippung. Sie lassen sich im Gegensatz zu leichten lateralen Verschiebungen nur mit gesteigertem Aufwand durch algorithmische Lösungen korrigieren.



2 mm

Bild 7.22: FC-Stecker

Es existieren eine Reihe von faseroptischen Steckverbindungen aus dem Bereich der Telekommunikation, die jedoch nur bedingt geeignet sind. Am besten geeignet ist der sogenannte FC-Stecker (Bild 7.22), bei dem durch eine Nut eine Verdrehung der Faser weitestgehend vermieden wird. Die Tauglichkeit dieses Steckertyps in Verbindung mit dem faseroptischen Multisensorsystem wurde in Versuchen, beispielsweise zur Reproduzierbarkeit bei Temperaturänderung, nachgewiesen.

7.4.3 Darstellung

Bei der Beschreibung des neugestalteten Bildleiters ist schon darauf hingewiesen worden, daß die Lücken zwischen den einzelnen dünnen Bildleitern zu groß sind, um ein zusammenhängendes Bild zu erhalten (vgl. Abschnitt 6.4.2). Die Erhöhung der Packungsdichte hat diesen Effekt zwar merklich gemindert allerdings nicht behoben. In Abschnitt 6.1 ist weiterhin auf die granulare Struktur eines endoskopischen Bildes sowie auf vorhandene Fehlstellen und Verwerfungslinien hingewiesen worden, die auch bei der Übertragung über ein kohärentes Faserbündel die Bildqualität negativ beeinflussen beziehungsweise Schwierigkeiten bei der Weiterverarbeitung der Bilder verursachen.

Mit einem neuartigen Interpolationsalgorithmus, der in Bild 7.23 schematisch dargestellt ist, konnte diese Problematik gelöst werden [EiKe 96]. Die Intensität jeder einzelnen Faser $I_0(n)$ wird dazu gemäß ihrem Flächenanteil A_{xy} auf ein Raster verteilt.

$$I_{x,y}(n) = I_0(n) \frac{A_{x,y}}{A_0}$$
Gl. 7.2

 A_0 bezeichnet die Gesamtfläche des Lichtpunktes und $I_{x,y}(n)$ die auf den Flächenanteil bezogene Intensität.



Bild 7.23: Schematische Darstellung des Interpolationsalgorithmus

Dabei ist die Gitterkonstante des Rasters so gewählt, daß sie in etwa dem Durchmesser des Lichtpunktes auf dem Detektor entspricht. Liegen mehrere Lichtpunkte anteilmäßig in einem Feld des Rasters, so werden die Einzelanteile entsprechend gemittelt.

Durch die in Zusammenhang mit der Kalibrierung gewonnenen Faktoren zum Ausgleich der individuellen Dämpfung entstehen auf diese Weise sehr homogene und hellere Bilder (Bild 7.24). Die Mosaikstruktur ist nicht mehr sichtbar.





Bild 7.24: Vergleich einer herkömmlichen endoskopischen Aufnahme mit der bearbeiteten Aufnahme

7.5 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit dem optoelektronischen Kalibrierverfahren in mehrerer Hinsicht eine wirtschaftliche Lösung zur Kalibrierung sowohl inkohärenter als auch kohärenter Faserbündel bereitgestellt worden ist. Die wichtigsten Errungenschaften, die mit diesem Verfahren möglich geworden sind, lauten:

- Der Kalibrierprozeß selbst ist einfach zu bedienen, schnell und reproduzierbar. Die Dauer der Kalibrierung wurde von mehreren Stunden auf wenige Minuten gesenkt. Die Reproduzierbarkeit sowie die Sicherheit der Zuordnung liegt bei nahezu 100 Prozent.
- Eine Bildübertragung über inkohärente Faserbündel ist nach einer einmaligen Kalibrierung möglich.
- Eine individuelle Gestaltung und funktionelle Erweiterung eines Lichtwellenleiterbündels kann realisiert werden.
- Da das komplette optische System bestehend aus Objektiv, Faserbündel und Abbildungsoptik kalibriert wird, werden nebenbei die Verzeichnungen der Optiken weitestgehend eliminiert. Dieser Punkt liefert einen weiteren Kostenvorteil hinsichtlich geringerer Fertigungstoleranzen.
- Auch die Bildqualität kohärenter Bildleiter wird in bezug auf Verzeichnungen, Verwerfungen und Mosaikstruktur verbessert.

8 Anwendung bei der Mikromontage

Die bisher beschriebenen Ideen zur Prozeßüberwachung mittels faseroptischer Sensoren sollen jetzt anhand zweier konkreter Beispiele aus dem Bereich der Mikromontage verifiziert werden. Zum einen wird die Integration von Miniatur-Endoskopen in Greifwerkzeuge beschrieben, um die Forderung hinsichtlich der Beobachtbarkeit der Montage zu erfüllen. Eingesetz wurden Endoskope, die von den geometrischen und optischen Eigenschaften her mit dem zur Zeit noch nicht vorhandenen Prototypen des multifunktionalen Bildleiters vergleichbar sind. Zum anderen wird eine Greifkraftsensorik vorgestellt, die ein weiterer wesentlicher Bestandteil des in Abschnitt 6.2 beschriebenen faseroptischen Multisensorsystems ist. Mit nur einer Auswerteeinheit ist dann sowohl die visuelle Beobachtung des Montageprozesses als auch die Erfassung weiterer prozeßrelevanter Daten inklusive rechnergestützter Regelung realisierbar.

8.1 Integration von Endoskopen in Handhabungswerkzeuge

In enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie ist über einen längeren Zeitraum hinweg eine Prozeßüberwachung durch flexible Miniatur-Endoskope in verschiedene Greifer integriert worden. Die einzelnen Entwicklungsschritte werden im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

8.1.1 Sukzessive Integrationsschritte

In ersten Vorversuchen ist ein Endoskop mit Hilfe eines Führungsröhrchens so an einen mechanischen Greifer [Hü 98] adaptiert worden, daß der Greifprozeß beobachtet werden konnte (Bild 8.1).



Bild 8.1: Erste Versuche zur Beobachtung der Greiferspitzen mit einem flexiblen Endoskop (Endogrip I)

Der Bildleiter besaß allerdings nur etwa 3.000 Bildpunkte, was zu keiner besonders guten Bildqualität führte. Außerdem wurde das Bauteil von der Seite aus betrachtet. Das erschwerte eine einfache Positionierung des Greifers [PfBr 98].

Schnell ist man dazu übergegangen, das Endoskop zentrisch zwischen den Greiferspitzen anzubringen. Ein vorhandener Greifer wurde daraufhin so modifiziert, daß eine Führung für das Endoskop integriert werden konnte (Bild 8.2) [BrDu 99a]. Bei diesem Greifer stimmten erstmals die Koordinatensysteme von Bewegungssystem und bildgebendem Verfahren überein. Eine Positionierung des Greifers ist damit erheblich einfacher geworden.



Bild 8.2: Versuchsaufbau mit piezogetriebener Pinzette

Die Weiterentwicklungen im endoskopischen Bereich ermöglichten es, bei gleichem Außendurchmesser eine bessere Bildqualität zu erreichen. Für die weiteren Untersuchungen ist ein Standardendoskop mit einem Durchmesser von 0,8 mm verwendet worden. Das Endoskop besitzt etwa 6.000 Bildpunkte und - gemessen von der optischen Achse - einen Öffnungswinkel von 30°.

Die Weiterentwicklung im Bereich der Handhabungswerkzeuge bestand darin, auf die Forderung nach Flexibilität zu reagieren (vgl. Abschnitt 3.1). Speziell bei mechanischen Greifern erfordert die Mannigfaltigkeit an Geometrien der Bauteile unterschiedliche Pinzettenspitzen. Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie ist deshalb ein Greifer entwickelt worden, bei dem die Pinzettenspitzen ausgetauscht werden können. Der Greifer ist von vornherein so ausgelegt, daß zentrisch zwischen den Greiferspitzen ein Endoskop eingesetzt werden kann (Bild 8.3) [Pe 00].



Bild 8.3: Prinzipskizze des modularen Pinzettengreifers (Quelle: Fraunhofer IPT)

Dieser Greifer nutzt eine feststehende Aktorik auf der Basis von Piezotranslatoren. Die an den Piezos anliegende Spannung kann zwischen 0 V und 500 V betragen und wird gemäß nachfolgender Beziehung in eine Längenänderung umgesetzt.

Stellweg =
$$0.1 \text{ µm/V}$$

GL 8.1

Über ein Getriebe in Form eines Hebelarms wird diese Längenänderung mit entsprechender Kraft auf einen austauschbaren Pinzetteneinsatz übertragen. Für verschiedene Geometrien und Greifweiten kann damit jeweils die optimal angepaßte Pinzette eingesetzt werden.

Den fertigen Greifer zeigt Bild 8.4. Mit diesem Greifer sind unter anderem Versuche im Hochvakuum des GK-REM durchgeführt worden [Hü 98]. Das integrierte Endoskop lieferte dabei erstmals farbige Bilder des Handhabungsprozesses aus dem evakuierten Innenraum. Hier zeigte sich wieder einmal die Unempfindlichkeit faseroptischer Sensoren gegenüber widrigen Umgebungsbedingungen.



1 cm

Bild 8.4: Endogrip II (Quelle: Fraunhofer IPT)

Die nachfolgende Bildsequenz zeigt den Ablauf der Greiferpositionierung über einem SMD-Bauteil (*Surface Mounted Device*) (Bild 8.5). Auf den einzelnen Bildern ist das Bauteil deutlich zu erkennen. Auch der Schriftzug auf der Oberfläche läßt sich entziffern. Am oberen und unteren Bildrand werden die Pinzettenspitzen sichtbar, die für das SMD-Bauteil speziell ausgelegt worden sind. Der Greifer ist in Bild 8.5a grob vorpositioniert. In Bild 8.5b liegt das Bauteil nun zwischen den Pinzettenspitzen. Der Greifer kann nun abgesenkt werden (Bild 8.5c). Ein Nachteil, der gegebenenfalls durch den multifunktionalen Bildleiter behoben werden kann, liegt in der fehlenden Information über den Abstand zum Bauteil. Bild 8.5d zeigt das gegriffene SMD-Bauteil. Die lateralen Maße des Bauteils betragen 1,0 mm x 2,0 mm.



2 mm

Bild 8.5: Bildsequenz der Greiferpositionierung

Das Positionieren und Greifen von Bauteilen kann auf diese Art und Weise somit einwandfrei beobachtet werden. Außerdem läßt sich überprüfen, ob das richtige Bauteil gegriffen wurde. Der überblendene Lichtfleck im Zentrum der Bilder ist auf die ringförmig um den Bildleiter angeordneten Fasern zur Beleuchtung und die Aufnahme mit einer CCD-Kamera zurückzuführen. Abhilfe kann hier die in Abschnitt 6.4.3.3 beschriebene CMOS-Technologie schaffen.

Endogrip II ist in einem weiteren Schritt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik um die Funktionalität des Lötens erweitert worden. Idealerweise kann so das Bauteil nach einer korrekten Positionierung auch ohne Zuführung weiterer Werkzeuge gefügt werden. Beispielhaft wurde das SMD-Bauteil auf eine Platine gelötet. Dazu wurden seitlich an den Greifer zwei Laseroptiken zur Fokussierung des Laserstrahls adaptiert, während die Strahlenergie über zwei Lichtwellenleiter zugeführt wurde (Bild 8.6).


Bild 8.6: Pick and Join (Quelle: Fraunhofer ILT)

Diese Anordnung mit den im Vergleich zu den Bauteilen riesigen Optiken, welche die Zugänglichkeit zum Montageort stark einschränken, kann durch Verwendung des multifunktionalen Bildleiters wesentlich kompakter ausfallen.

Beim Löten treten Prozeßgase und Spritzer auf, welche die empfindliche Optik des Endoskops beschädigen können. Deshalb ist es wünschenswert, das Endoskop in das Führungsröhrchen zurückziehen zu können. Zusätzliche Vorteile einer solchen Kinematik bestehen darin, daß einerseits das Endoskop durch die Greiferspitzen hindurchgeschoben werden kann, um das durch die Pinzetten eingeschränkte Blickfeld beispielsweise für die Bauteilsuche zu vergrößern, und andererseits, um den Abbildungsmaßstab durch Verändern des Abstandes zum Objekt zu variieren.

Endogrip II ist daraufhin mit einem Linearantrieb zur Verschiebung des Endoskops ausgerüstet worden. Die Anforderungen an den Motor bezüglich möglichst geringen konstruktiven Änderungen, Stellweg, Geschwindigkeit und Präzision wurden am besten durch einen piezogetriebenen Nanomotor erfüllt [KIKI 96]. Der Aufbau des Motors ist in Bild 8.7 schematisch dargestellt.



Bild 8.7: Aufbau des Nanomotors (Quelle: Nanotechnik)

Der gesamte Motor besteht aus einem Gehäuse (Mounting), in welches der eigentliche Nanomotor zu einem kleinen Teil geschoben wird. Der Nanomotor besteht wiederum aus einem Piezoröhrchen und der Halterung - dem sogenannten beweglichen Läufer - für die Trägerrohre (Carrier Tube). Bei dem hier ausgewählten Modell wird das Trägerrohr einseitig aus dem Motor geführt. Durch dieses Trägerrohr mit einem Innendurchmesser von 1,3 mm läßt sich nun hervorragend das 0,8 mm dicke Glasfaserbündel führen.

Die translatorische Bewegung des Nanomotors wird dadurch erreicht, daß an die beiden Elektroden des Piezoröhrchens eine Spannung angelegt wird. Die Folge ist eine Ausdehnung des Piezos, die auf den beweglichen Läufer übertragen wird. Die dabei benutzten Spannungsauflösungen liegen bei 10 nm pro Volt. Mit der hier verwendeten PC-Karte erreicht man eine Positioniergenauigkeit von ungefähr einem Nanometer, bei einer Auflösung von 8-Bit und ±15 Volt Maximalspannung. Diese Art der Ansteuerung deckt den Feinschrittbereich ab.

Den Grobschrittbereich erhält man, indem die Massenträgheit des beweglichen Läufers ausgenutzt wird. Dies geschieht durch die Auflegung von sägezahnförmigen Spannungspulsen auf das Piezoröhrchen des Nanomotors. Dadurch entsteht einen Schrittmotorbetrieb, denn der Läufer verschiebt sich bei jedem Spannungspuls ein kleines Stück relativ zum Piezo. Der Feinschrittbereich ist jedoch größer als diese Verschiebung und deckt damit einen Grobschritt mit erhöhter Präzision ab. Ein Größenvergleich zwischen dem Nanomotor und einem Mikrochip offenbart die geringen Abmessungen des Motors (Bild 8.8).



Bild 8.8: Nanomotor im Vergleich zu einem Mikrochip (Quelle: Nanotechnik)

In einem weiteren Optimierungsschritt ist der Greifer vom Fraunhofer IPT nochmals kompakter ausgelegt worden (Bild 8.9). Dieser Greifer wurde entsprechend Endogrip III genannt [Pe 99].



Bild 8.9: Endogrip III mit aufgesetztem Nanomotor

8.1.2 Weiterer Handlungsbedarf

Nach der erfolgreich abgeschlossenen Integration der Endoskope in die Handhabungswerkzeuge kommt es nun darauf an, die gewonnenen Bildinformationen auszuwerten. Die in Abschnitt 7 beschriebene Kalibrierung der Bildleiter sowie die zusammenhängende, homogene Darstellung des endoskopischen Bildes (vgl. Abschnitt 7.4.3) trägt wesentlich zur Vereinfachung dieser Auswertung bei. Standardalgorithmen der Bildverarbeitung zur Objekterkennung und Klassifizierung können nun ohne weiteres angewandt werden. Die gewonnenen Daten können an die Positioniereinheit zurückgeführt werden und schließen damit den Regelkreis (vgl. Bild 6.7).

Die Integration von flexiblen Endoskopen in Präzisionsgreifer erleichtert die laterale Positionierung in Bezug zum Bauteil. Eine in diesem Zusammenhang stehende Untersuchung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. hat den Nachweis erbracht, daß gekoppelt mit einer Auswertung durch Bildverarbeitungsalgorithmen die Positioniergenauigkeit und die Reproduzierbarkeit der Positionierung deutlich verbessert werden kann [StGr 98].

Jedoch ist damit noch nicht sichergestellt, daß der Greifer in der richtigen Höhe zupackt. Eine zusätzliche Sensorik, mit der der Abstand zum Bauteil erfaßt wird, ist deshalb unbedingt erforderlich. Zwar können über die Größe des Bauteils im Bild auch Rückschlüsse auf den Abstand gezogen werden, eine flexible Lösung für diese Problemstellung besteht darin allerdings nicht. Es ist vielmehr vorstellbar, daß auf der Basis des Kalibrierverfahrens und der in Abschnitt 7 beschriebenen Ansätze zur zentrischen Integration einer Laserfaser ein Sensor nach dem Reflexkoppler- oder Triangulationsprinzip entwickelt werden kann, mit dem der Abstand genauer und vor allen Dingen bauteilunabhängig bestimmt wird.

8.2 Faseroptische Greifkraftsensorik

Das in den Greifer integrierte Endoskop ermöglicht zwar schon ein wesentlich sichereres Handhaben der Mikrobauteile, es sind aber keine Aussagen darüber möglich, ob das Objekt mit einer ausreichenden und trotzdem nicht zu großen Haltekraft gegriffen wurde. In Bild 8.10a-f sind verschiedene Greifzustände aus endoskopischer Sicht dargestellt. Ausgehend von der offenen Pinzette erfolgt die Zustellung des Greifers in zwei Schritten. In Bild 8.10a liegt das Bauteil gut positioniert zwischen den Greiferspitzen, wird jedoch noch nicht gehalten. Bild 8.10b zeigt den Zustand bei einer an den Piezoaktoren anliegenden Spannung von 200 V. Jeder Pinzettenarm hat sich jetzt um etwa 350 µm bewegt. Es ist nicht genau auszumachen, ob das Bauteil schon gegriffen wurde, obwohl die Pinzette den Quader zu berühren scheint. In Bild 8.10c ist der Quader nun sicher gegriffen. Die Spannung an den Piezos beträgt jetzt 400 V. Allerdings läßt sich kaum eine Veränderung zu Bild 8.10b ausmachen, geschweige denn eine Aussage darüber treffen, ob das Bauteil durch eine zu große Krafteinwirkung beschädigt wird. Zum Vergleich zeigen die Bilder 8.10d-f die gleichen Greifzustände ohne Bauteil.



Bild 8.10: Verschiedene Greifzustände mit a)-c) und ohne Bauteil d)-f)

Bild 8.10 macht deutlich, daß alleine durch Beobachten des Greifens noch keine sichere Montage gewährleistet werden kann. Ein zusätzlicher Sensor, der die Greifkraft erfaßt ist deshalb erforderlich. Es existieren verschiedene Ansätze, um die Greifkraft aufzunehmen (vgl. Abschnitt 3.1). Problematisch in diesem Fall ist aber, daß die Sensorik möglichst nah am Ort der Krafteinleitung plaziert und dabei gleichzeitig berücksichtigt werden muß, daß die Flexibilität des Greifers in Zusammenhang mit der Austauschbarkeit der Pinzetten gewahrt bleibt.

Die einzig sinnvolle Lösungsmöglichkeit in diesem Zusammenhang besteht darin, die Verbiegung der Pinzette nach dem Kontakt mit dem Bauteil zu detektieren. Das Prinzip ist in Bild 8.11 verdeutlicht.



Bild 8.11: Verbiegung der Pinzette beim Greifen eines Bauteils

Für den faseroptischen Sensor heißt das, daß die Verbiegung in ein optisches Signal umgewandelt werden muß. Vorzugsweise sollte sich die Intensität ändern, damit eine einfache Auswertung mittels CCD- oder CMOS-Kamera erfolgen kann.

8.2.1 Mögliche Konzepte

In theoretischen Voruntersuchungen sind verschiedene Ansätze zur Auslegung und Positionierung der Faseroptik durchgerechnet und auch auf ihre praktische Durchführbarkeit hin bewertet worden. Ein erster Ansatz sah vor, kleine spiegelnde Oberflächen an den Pinzetten anzubringen, die entsprechend der Verbiegung der Pinzette das mit einem Lichtwellenleiter zugeführte Licht so ablenken, daß es in eine zweite Faser einkoppelt (Bild 8.12).



Bild 8.12: Schematische Darstellung zur Integration eines faseroptischen Greifkraftsensors

Die Berechnungen und Simulationen haben jedoch ergeben, daß aufgrund der numerischen Apertur der Glasfasern (grau hinterlegter Bereich in Bild 8.13) und der benötigten Wegauflösungen der Abstand zwischen Fasern und Spiegel sehr groß gewählt werden muß. Um diesen Abstand zu verkürzen, muß der Spiegel von vornherein geneigt oder die Fasern gegeneinander unter einem Winkel angeordnet sein (Bild 8.13) [BrDu 99b].

Für die Berechnungen sind folgende Parameter zugrunde gelegt worden:

- Abstand der Faserachsen d: 100 µm
- Radius des Faserkerns r: 25 µm
- Numerische Apertur *NA*: 0,22 entspricht 12,71°

Der Abstand der Fasern vom Spiegel ist mit D bezeichnet.

$$Neigungswinkel = \frac{1}{2}\arctan(\frac{d}{D})$$
Gl. 8.1

Winkeländerung =
$$\frac{1}{2} \arctan(\frac{d+r}{D}) - Neigungswinkel$$
 Gl. 8.2

$$Abstandsänderung = D - \frac{d - r}{\tan(2 \cdot Neigungswinkel)}$$
Gl. 8.3



Bild 8.13: Notwendige Abstands- oder Winkeländerung als Voraussetzung für die indirekte Erfassung der Greifkraft bei Anordnung der Sensorik gemäß Bild 8.12

Bei einem zweiten Ansatz besteht die Idee darin, eine Reflektorfolie mit mikroskopisch kleinen Katzenaugen (Bild 8.14) auf den Schenkel des Pinzetteneinsatzes zu kleben, um den Abstand *D* zu verkürzen. Der Vorteil liegt darin, daß bei dieser Struktur das reflektierte Licht parallel zum einfallenden Licht verläuft und damit die Einschränkungen in bezug auf numerische Apertur der Faser und Abstand zur Oberfläche nicht so stark ins Gewicht fallen.



Bild 8.14: 3D-Aufnahme der Reflektorfolie

Ein dritter Ansatz nutzt zwar weiterhin die Verbiegung der Pinzette bei Auftreten einer Gegenkraft, die Detektion ist aber nicht in dem Maße abhängig vom Abstand oder der numerischen Apertur wie im oben beschriebenen Fall. Dieser Ansatz basiert auf einer Pinzettenkonstruktion, bei der sich ein dünner Spalt von nur 200 µm Breite beim Auftreten der durch das gegriffene Bauteil erzeugten Gegenkraft verengt. Der Spalt wird mit der Sendefaser beleuchtet. Die parallel zur Sendefaser liegende Empfangsfaser detektiert nun eine Verschiebung der Kanten in Form einer Intensitätsänderung. Das Funktionsprinzip ist in Bild 8.15 schematisch dargestellt.



Bild 8.15: Schematische Darstellung des faseroptischen Greifkraftsensors

Zur Verifizierung der beiden letztgenannten Ansätze mußte im folgenden ein entsprechender Pinzetteneinsatz entwickelt und gefertigt werden. Besonderes Augenmerk mußte dabei auf die Dimensionierung des zusätzlichen Festkörpergelenks gelegt werden, um schon bei einer geringen Kraft eine merkliche Verbiegung der Pinzette zu erreichen. FEM-Simulationen des Fraunhofer IPT ergaben, daß eine Dicke des Festkörpergelenks von 100 µm ausreicht, um eine entsprechende Verbiegung hervorzurufen. Eine der zwei gefertigten Pinzetten zeigt Bild 8.16.

Eine genaue Überprüfung der extern gefertigten Pinzetteneinsätze mit dem Laser-Scanning-Mikroskop ergab, daß die vorgegebenen Werte in bezug auf das zusätzliche Gelenk in keinem Fall eingehalten wurden. Es traten Stegbreiten von 35 μ m bis 130 μ m auf. Da zu erwarten ist, daß die größtmögliche Verbiegung bei dem Pinzettenschenkel mit der Dicke des Festkörpergelenks von 35 μ m auftritt, wurde diese Pinzette für die weiteren Versuche ausgewählt. Für die geplanten Versuche kommt noch erschwerend hinzu, daß der Federwerkstoff, aus dem die Pinzette gefertigt werden muß, Licht schlecht reflektiert. Die Oberfläche in der Umgebung des Spaltes mußte deshalb zunächst poliert und anschließend verchromt werden. Das konnte allerdings erst im Anschluß an den Versuch mit der aufgeklebten Reflektorfolie geschehen.



Bild 8.16: Fertiger Pinzetteneinsatz

Der experimentelle Aufbau sowie die Ergebnisse der Versuche, die zur Verifizierung der gemachten Annahmen an einem realen Bauteil dienen sollen, sind Thema der folgenden Abschnitte.

Dabei ist zu beachten, daß diese Versuche aufgrund der instabilen Randbedingungen nur für den Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit herangezogen werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse können dann dazu dienen, eine optimierte Auslegung eines neuen Greifers inklusive Sensorik zu entwickeln.

8.2.2 Experimenteller Aufbau und erste Ergebnisse

Der generelle Versuchsaufbau zur Greifkrafterfassung ist in Bild 8.17 dargestellt. Der Greifer wird höhenverstellbar gehalten und ist zentrisch mit einem flexiblen Endoskop zur Überwachung des Greifprozesses versehen. Die Sende- und Empfangsfaser sind direkt nebeneinander auf einem Mikrostelltisch fixiert. Damit kann der Abstand der Fasern zur Pinzette eingestellt werden. Das Licht einer Kaltlichtquelle koppelt in die Sendefaser ein, während der Ausgang der Empfangsfaser über eine Mikroskopoptik auf den Detektor abgebildet wird. Als Detektor wird eine CCD-Kamera verwendet.



Bild 8.17 Versuchsaufbau zur Greifkrafterfassung

8.2.2.1 Versuchsaufbau mit aufgeklebter Reflektorfolie

Wie weiter oben schon erwähnt, sind zunächst Versuche mit einer aufgeklebten Reflektorfolie durchgeführt worden. Eine Detailansicht des Versuchsaufbaus ist in Bild 8.18 gegeben.



Bild 8.18 Versuchsaufbau zur Greifkrafterfassung mit aufgeklebter Reflektorfolie (Detailansicht)

Mit dem in Bild 8.18 gezeigten Aufbau ist in einem ersten Versuch eine Meßreihe aufgenommen worden, bei der die Spannung an den Piezotranslatoren in 20 Volt Schritten von 0 V auf 400 V erhöht wurde. Nach jeder Erhöhung der Spannung ist das Bild der CCD-Kamera von der Ausgangsseite der Empfangsfaser aufgenommen und abgespeichert worden. Diese Meßreihe ist zunächst ohne Bauteil und anschließend mit einem zu greifenden Bauteil durchgeführt worden. Bei dem Bauteil handelt es sich um einen Kunststoffquader mit den Maßen 1 mm x 1 mm x 2 mm. Um einen Pinzettenwechsel zu simulieren, ist der gleiche Versuch einige Wochen später nochmals durchgeführt worden, nachdem die Pinzette anderweitig eingesetzt worden war. Im zweiten Versuch wurde die Schrittweite der Spannung auf 10 V verringert. Die Empfangsfaser ist diesmal mit einer monochromen CCD-Kamera aufgenommen worden, um zusätzlich noch den Einfluß des Detektors zu untersuchen.

8.2.2.2 Ergebnisse

Das Ergebnis der ersten Meßreihe ist vielversprechend (Bild 8.19). Über der Spannung (vgl. Bild 8.3 und Gl. 8.1) sind die jeweiligen Verläufe der Intensität aufgetragen. Bemerkenswert ist der nahezu lineare Verlauf der Kennlinien. Während die Kennlinie für den Vorgang ohne Bauteil monoton steigt, ändert sich ab einer Spannung von etwa 140 V die Steigung der Kennlinien für den Vorgang mit Bauteil in monoton fallend. Dieser Wendepunkt kann als der Punkt betrachtet werden, an dem das Bauteil gegriffen wird. Die Annahme deckt sich mit den Beobachtungen, die ein erstmaliges Halten des Bauteils in diesem Spannungsbereich ergaben.



Bild 8.19: Intensitätsverlauf der ersten Meßreihe

Bild 8.20 zeigt die Meßreihe mit den veränderten Randbedingungen hinsichtlich zwischenzeitlich anderweitiger Nutzung des Pinzetteneinsatzes und verwendeter Kamera.



Bild 8.20: Intensitätsverlauf der zweiten Meßreihe

Auch hier läßt sich ein linearer Verlauf der Kennlinien feststellen. Die Intensitätswerte liegen jedoch in diesem Fall insgesamt gesehen deutlich niedriger. Der Grund dafür liegt sowohl in der Nutzung einer weniger empfindlichen Kamera als auch in möglicherweise veränderten Einkoppelverhältnissen aufgrund des Pinzettenwechsels. Ab einer Spannung von etwa 300 V ist jedoch wiederum eine Trendwende zu bemerken, die auf ein Greifen des Bauteils schließen läßt. Das spätere Einsetzen einer Intensitätsänderung im Vergleich zur ersten Meßreihe kann auf eine Vergrößerung der Greifweite des Pinzetteneinsatzes und damit auf ein späteres Einsetzen des Greifens zurückgeführt werden, die wiederum durch den Wechsel der Pinzette hervorgerufen wurde.

8.2.2.3 Versuchsaufbau mit verchromter Pinzette

Um die weiter oben genannten Einschränkungen in bezug auf die Reflexionseigenschaften der Pinzettenoberfläche zu verbessern, ist für die Aufnahme von Meßreihen nach dem Prinzip der Spaltverjüngung die Region um den Spalt zunächst poliert worden. Der gesamte Pinzetteneinsatz ist weiterhin verchromt worden, um ein nachträgliches Anlaufen des Kupfermaterials zu verhindern. Die Detailansicht des Versuchsaufbaus zeigt Bild 8.21.



Bild 8.21 Versuchsaufbau zur Greifkrafterfassung mit verchromter Pinzette (Detailansicht)

Die Sende- und Empfangsfasern sind in diesem Fall so ausgerichtet worden, daß gerade noch eine Reflexion an der unteren Kante des Spalts detektiert werden kann. Bei einer leichten Verbiegung der Pinzette aufgrund der durch das gegriffene Bauteil aufgebrachten Gegenkraft schließt sich der Spalt und vergrößert so die Fläche, an der das Licht der Sendefaser reflektiert werden kann. Wiederum wurden zwei verschiedene Kameras verwendet. Diesmal wurden die einzelnen Versuche jedoch direkt nacheinander durchgeführt.

8.2.2.4 Ergebnisse

Bild 8.22 zeigt den Verlauf der Intensität bei Verwendung der vermeintlich empfindlicheren CCD-Kamera. Nach einem leichten Rückgang der Intensität bei einer anliegenden Spannung von etwa 50 V bleibt die Intensität bei einer weiteren Zustellung der Pinzette konstant. Die Verringerung der Intensität zu Beginn des Greifvorgangs ist damit zu erklären, daß durch die

Verbiegung der gesamten Pinzette der Lichtkegel weiter in den Spalt wandert und damit auch weniger Licht reflektiert werden kann.



Bild 8.22: Intensitätsverlauf der ersten Meßreihe

Ab einer Spannung von 180 V ist gegenüber der Kennlinie, die ohne Bauteil aufgenommen wurde, nun eine Änderung bei der Kennlinie zu sehen, bei der ein Bauteil gegriffen wurde. Das Einsetzen des Greifens kann wieder an diesem Punkt festgemacht werden und deckt sich mit der visuellen Beobachtung.

Das Ergebnis des zweiten Versuchs ist in Bild 8.23 dargestellt. Genau wie beim ersten Versuch verlaufen die Kennlinien bis zum Einsetzen des Greifens identisch. Im Bereich von 200 V beginnt auch bei diesem Versuch der Greifprozeß und äußert sich in einem Anstieg der Intensität. Dieser Anstieg fällt jedoch gegenüber der ersten Kamera geringer aus. Außerdem ist die Verringerung der Intensität bei etwa 50 V nicht zu beobachten. Die auch insgesamt gesehen geringeren Graustufenwerte lassen auf eine verminderte Empfindlichkeit dieser CCD-Kamera schließen.

Der Unterschied von fast 60 Graustufen, der zwischen den beiden Kameras im Versuch mit der aufgeklebten Reflektorfolie aufgetreten ist, läßt sich damit allerdings nicht erklären. Wie schon vermutet, sind diese Abweichungen auf Änderungen aufgrund des Pinzettenwechsels zurückzuführen, die sich negativ auf die Einkopplung des Lichts in die Lichtwellenleiter auswirkt haben.



Bild 8.23: Intensitätsverlauf der zweiten Meßreihe

8.2.3 Weiterer Handlungsbedarf

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Erfassung der Greifkraft mit faseroptischen Sensoren prinzipiell machbar ist. Allerdings besteht noch weiterer Handlungsbedarf, um die Ergebnisse zu optimieren und reproduzierbar zu gestalten.

Allgemein müssen zunächst die Einfluß nehmenden Parameter stabilisiert werden. Die Sendeund Empfangsfaser müssen definiert am Greifer angebracht werden. Die Pinzette selbst erfordert einen sicheren Fertigungsprozeß mit engen Toleranzen. Der vorgenommene manuelle Wechsel des Pinzetteneinsatzes muß weitestgehend automatisiert werden, um unbeabsichtigte Verbiegungen und Lageänderungen zu minimieren. Die Position der Reflektorfolie ist ein weiterer kritischer Punkt. Wenn die Oberflächenstruktur nicht während der Fertigung aufgebracht werden kann, ist ein nachträgliches Aufkleben an immer der gleichen Stelle problematisch. Vorzuziehen wäre in diesem Fall der zweite Ansatz, in dem bei Verbiegung ein Spalt verjüngt wird. Dazu muß die Pinzette jedoch poliert und mit einer stark reflektierenden Oberfläche beschichtet werden. Erst im Anschluß an diese Schritte stehen Untersuchungen an, um die optimale Kombination der optischen und geometrischen Parameter der Fasern zu erhalten. Danach dürfte einer einfachen Logik zur Auswertung der Signale nichts mehr im Wege stehen.

9 Ergebnis

In den vorangegangenen Abschnitten sind die grundlegenden Schritte für ein faseroptisches Prozeßüberwachungssystem beschrieben worden. Sowohl bildgebende Verfahren zur Objekterkennung und Positionierung als auch einfache Sensoren zur Erfassung zusätzlicher Parameter sind realisiert worden. Es konnte die Machbarkeit der Prozeßüberwachung mittels faseroptischer Sensoren nachgewiesen werden.

Als abschließendes Ergebnis kann festgehalten werden, daß mit dem vorgestellten faseroptischen Multisensorsystem

- eine direkte farbgetreue Beobachtung in veränderlichem Abstand vorgenommen werden kann, ohne das Montagewerkzeug in seiner Bewegungsfreiheit einzuschränken,
- eine integrierte Sensorik zur Erfassung der Greifkraft entwickelt wurde, die auch um die Detektion anderer Parameter erweitert werden kann,
- die integrierte Sensorik nicht fest mit einem speziellen Greifer verbunden ist, und daher die Flexibilität des Montagewerkzeugs gewährleistet ist,
- die Informationen aus Bild- und Sensordaten von einem einzelnen System gemeinsam weiterverarbeitet und korreliert werden können,
- eine zusätzlich integrierte Bearbeitung oder Meßtechnik beispielsweise durch Laserstrahlung in Form eines multifunktionalen Bildleiters integriert werden kann,

- eine Rückführung der Daten auf der Grundlage der optischen Signale an die Montagewerkzeuge möglich geworden ist,
- keine Einschränkungen durch widrige Umgebungsbedingungen hingenommen werden müssen,
- die Kombination des Gesamtsystems mit anderen bildgebenden Verfahren im Bereich der Mikrosystemtechnik unter dem Dach der digitalen Bildverarbeitung leicht möglich ist.

Gespiegelt an den Defiziten und Forderungen aus Abschnitt 3.1 und 3.2 ist damit letztendlich der Nachweis erbracht, daß faseroptische Sensoren in den wichtigsten Kernpunkten der Prozeßüberwachung bei der Montage hybrider Mikrosysteme anderen bekannten Ansätzen überlegen sind.

10 Ausblick

Aufbauend auf den Erfahrungen und Ergebnissen, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen wurden, sind die unterschiedlichsten Weiterentwicklungen und Anwendungsmöglichkeiten denkbar. Ein paar Denkanstöße sollen hier gegeben werden.

Es ist gezeigt worden, daß je nach Anwendungsfall die maximale Anzahl an Lichtwellenleitern beliebig aufgeteilt und sowohl für bildgebende als auch sensorische Zwecke genutzt werden kann. Damit sind visuelle Inspektionen an verschiedenen Stellen gleichzeitig oder sogar Stereobilder möglich [Ka 94, Po 99]. Mit einer exzentrisch gelegenen Lichtquelle ist auch die Miniaturisierung von Triangulations- oder Lichtschnittsensoren denkbar.

Auch die CMOS-Technologie liefert Möglichkeiten für weitere Anwendungen. Effekte wie das Schweißen rufen starke Reflexionen hervor, die bei Verwendung einer CCD-Kamera zum Blooming führen. Mit einer CMOS-Kamera ist dagegen der Schweißprozeß beobachtbar [Ta 98]. Der wahlfreie Zugriff und die Auswertung einzelner Bildpunkte, wie sie in Abschnitt 6.4.3.3 beschrieben worden ist, birgt Geschwindigkeitsvorteile und kann ergänzt werden mit einer neuen Technik zur Abstandsmessung. Dabei wird das Objekt mit moduliertem Licht beleuchtet und der Abstand mit Hilfe der Phasenlage des reflektierten Lichts auf dem CMOS-Chip detektiert [Bu 99, BuSc 99]. Die Auflösung ist derzeit zwar noch nicht ausreichend, um Abstände im 100 µm Bereich zu erfassen, der technologische Fortschritt und die Gegebenheit, daß das modulierte Licht auch über zwischengeschaltete Faseroptiken übertragen werden kann, liefert neue Gestaltungsspielräume.

Im Bereich der minimal invasiven Medizin bedarf es einer hohen Funktionalität der Endoskope, um auf engstem Raum operieren zu können. In vielen Fällen enthält ein Endoskop neben dem Bildleiter und Fasern zur Beleuchtung der Szenerie noch zusätzliche Kanäle zum Saugen, Spülen oder Führen weiterer Instrumente. Mit geringer werdendem Durchmesser der Endoskope sinkt jedoch die Qualität des endoskopischen Bildes sowie die Funktionalität, da im Grenzfall nur noch Platz für den Bildleiter und die Beleuchtung bleibt. In diesem Zusammenhang lassen sich die Ergebnisse dieser Arbeit nahezu vollständig in den medizinischen Bereich übertragen. Die Funktionalität und die Bildqualität flexibler Miniatur-Endoskope kann mit dem vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung inkohärenter Bildleiter verbessert werden [Br 97]. Die zentrische Lage der Laserfaser bietet beispielsweise den Vorteil, daß der Chirurg genau im Zentrum seines Sichtfeldes operiert.

Zum Abschluß soll ein weiter gefaßtes Konzept zur Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik vorgestellt werden. Führt man die Idee zur Kombination verschiedener faseroptischer Sensoren weiter und bezieht die Kombination auf ganze Meß- und Überwachungssysteme mit ähnlichem Ausgangssignal, so erhält man ein modular aufgebautes Prozeßüberwachungssystem, das gerade in der Mikrosystemtechnik viele Vorteile mit sich bringt. Basierend auf einem Mikroskop, das standardmäßig eingesetzt wird, um kleinste Bauteil zu visualisieren, kann ein solches System um weitere Bausteine ergänzt werden. Um beispielsweise die dritte Dimension abzudecken, kann das Mikroskop um die Funktionalität eines konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops (LSM) erweitert werden [PfDu 98, PfDu 99, DuBr 99a, DuBr 99b]. Feinste Strukturen im Nanometerbereich, die optisch nicht mehr aufzulösen sind, können nach dem Prinzip der Rasterkraftmikroskopie mit einem Ultraobjektiv aufgenommen werden [Ze 95]. Alle diese Verfahren können leicht miteinander kombiniert werden. Da sie auch alle als Ergebnis ein Bild des Objekts liefern, besteht weiterhin die Kombination mit anderen bildgebenden Verfahren - wie zum Beispiel den faseroptischen Sensoren (FOS) unter dem Dach der digitalen Bildverarbeitung. Der Grundgedanke dieses Konzeptes ist in Bild 10.1 veranschaulicht. Das Akronym MILOS steht dabei für Modular In-Line Observation System [PfFr 99, PfDu 00]. Mit diesem System soll ein Unternehmen in die Lage versetzt werden, auf unterschiedliche Anforderungen der Qualitätsprüfung und der Prozeßüberwachung flexibel reagieren zu können. Das System deckt ein breites Spektrum an Aufgabenstellungen innerhalb der Mikrosystemtechnik ab und ist nachträglich erweiterbar.



Bild 10.1: Das MILOS Konzept

11 Zusammenfassung

Mancher Zukunftsforscher wird enttäuscht sein, wenn es in den nächsten zehn Jahren kein miniaturisiertes U-Boot gibt, das selbständig durch die Blutbahn fährt und dabei beispielsweise Kalkablagerungen abbaut.

Die Mikrosystemtechnik eröffnet sicherlich eine Vielzahl von Möglichkeiten für neue Produkte und Anwendungen, momentan hat diese zukunftsträchtige Technologie jedoch vielmehr damit zu kämpfen, einen Markt zu erobern, der eine breite Produktpalette verlangt. Gleichzeitig müssen die hohen Anforderungen des Verbrauchers hinsichtlich des Preis-Leistungsverhältnisses berücksichtigt werden. Um diese Forderungen zu erfüllen, bedarf es einer innovativen Produktionstechnologie speziell für hybrid aufgebaute Mikrosysteme. Denn die Integration der verschiedenen Funktionalitäten eines Mikrosystems kann letztendlich nur durch die Kombination verschiedener Komponenten, die wiederum aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen können, realisiert werden. In diesem Zusammenhang spielt die Montage hybrider Mikrosysteme und mit der Montage auch die Prozeßüberwachung eine wesentliche Rolle.

In dieser Arbeit sind auf der Basis faseroptischer Sensoren einige neue Verfahren vorgestellt worden, die eine Grundlage für weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet liefern. Ausgangspunkt war der einzelne faseroptische Sensor, mit dem sich prinzipiell eine Vielzahl wichtiger physikalischer Größen detektieren lassen. Die Kombination dieser einzelnen Sensoren führte zunächst zu einer vereinfachten Auswertung und Verknüpfung der optischen Signale. Durch die Bündelung der Lichtwellenleiter ergaben sich neue Applikationsmöglichkeiten in der Sensorik. Speziell die Entwicklung eines multifunktionalen Bildleiters verspricht auf engstem Raum mehr Funktionalität und Flexibilität bei der Prozeßüberwachung. Das für die Auswertung der Signale notwendig gewordene Kalibrierverfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit optimiert und an die Forderungen des multifunktionalen Bildleiters adaptiert. In einem konkreten Anwendungsfall sind Endoskope und weitere faseroptische Sensoren zur Greifkrafterfassung in einen Greifer für die Mikromontage erfolgreich integriert worden.

Die Erfahrung hat aber auch gezeigt, daß ein einzelnes Überwachungssystem für sich genommen immer nur Teilbereiche abdecken kann. Der Ansatz zur Kombination mehrerer verschiedenartiger Sensoren mit ähnlichem Ausgangssignal findet im innovativen Konzept des modular aufgebauten Überwachungssystems (MILOS) seine Fortsetzung.

Es ist sicher noch ein weiter Weg bis zur vollautomatisierten Mikromontage, insgesamt läßt sich jedoch festhalten, daß mit dieser Arbeit der Grundstein für weiterführende Entwicklungen auf dem Gebiet der Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik gelegt wurde.

"Der Anfang ist der wichtigste Teil der Arbeit." (Plato)

12 Literatur

[BaGo 82]	Bauer, F.; Goos, G.; Paul, M.:	Informatik. Erster Teil, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982
[BiCu 99]	Bierhals, R.; Cuhls, K. u.a.:	Wirtschaftliche Potentiale der Miniaturisierung aus industrieller Sicht. Studie im Auftrag des Wirt- schaftsministeriums Baden-Württemberg, Karlsruhe und Stuttgart 1999
[BMBF 94]	N.N.:	Mikrosystemtechnik 1994-1999. Hrsg.: Bundesmini- sterium für Forschung und Technologie. Programm im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstech- nik. Januar 1994
[BMBF 99]	N.N.:	Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt MikroEndo, Förderkennzeichen 16SV36X, 1999
[BoCl 98]	Botthof, W.; Clau- ßen, A. u.a:	Innovation durch Mikrointegration – Intelligente Pro- dukte über Systemintegration von Mikro-, Bio- und Nanotechniken. VDI/VDE-Technologiezentrum In- formationstechnik, Teltow 1998
[Br 96]	Bryzek, J.:	Kona Conference raises 4 issues about commerciali- zation of MEMS. Micromachine Devices 2 (1996), pp. 1-2

[Br 97]	Bröcher, B.:	Miniature Laser Endoscope. Mst-news. Nummer 19 Februar 1997, S. 12
[BrDu 99a]	Bröcher, B.; Duss- ler, G.:	Einblick in eine neue Dimension. Tools 2/1998, S 6-7
[BrDu 99b]	Bröcher, B.; Duss- ler, G.; Pfeifer, T.:	Fibre-Optic Supervision for the Micro-Assembly Pro- cess. In: McKeown, P. u.a. (Hrsg.): precision engi- neering – nanotechnology: Proceedings of the 1 st In- ternational euspen Conference. Vol. 2, Shaker Verlag Aachen 1999, S. 157-160
[Bu 99]	Buxbaum, B.:	Charakterisierung eines neuartigen OE-Mikrosensors (PMD) mit breitem Anwendungspotential. Tagungs- band 11. Workshop Jenasensorik, S. 6 ff., Jena, 1999
[BuSc 99]	Buxbaum, B.; Schwar- te, R. u.a.:	Charge Transfer Simulation in PMD-Structures. Kongreßband Sensor 99, Vol. 2: Sensors, Transducers & Systems, S. 427-432, AMA Service GmbH, Nürn- berg 1999
[DaCu 88]	Dakin, J.; Culshaw, B.:	Optical Fibre Sensors: Principles and Components. Vol. 1, Artech House, Inc., Norwood, MA 1988
[De 96]	N.N.:	Pseudo-Coherent Fibre Optic Bundle. Defence Eva- luation & Research Agency, Portsmouth, Hampshire 1996
[DuBr 99a]	Dussler, G.; Brö- cher, B.; Pfeifer, T.:	Confocal Imaging: New Possiblity for the Inspection of Microsystems. In: McKeown, P. u.a. (Hrsg.): pre- cision engineering – nanotechnology: Proceedings of the 1 st International euspen Conference. Vol. 2, Sha- ker Verlag Aachen 1999, S. 324-327

[DuBr 99b]	Dussler, G.; Brö- cher, B.; Pfeifer, T.:	Inspection of Microsystems with a Laser-Scanning- Microscope. In: Christophe Gorecki: Microsystems Metrology and Inspection, Proceeding of SPIE Vol. 3825, pp. 144-150, Bellingham, Washington 1999
[El 96]	Elbel, Th.:	Mikrosensorik. Vieweg Verlag 1996, S. 89ff
[Eh 95]	Ehrfeld, W.:	Technologie mit Zukunft. Industrie Anzeiger 21 (1995), S. 28
[EhLe 95]	Ehrfeld, W.; Lehr, H.:	Deep X-ray lithography for the production of three-dimensional microstructures from metals, po- lymers and ceramics. Radiat. Phys. Chem. Vol. 45, No. 3, 1995, pp. 349-365
[EiKe 96]	Eikelmann, E.; Kel- ler, St.; Pfeifer, T.:	DE 43 18 140 A1: Verfahren zur Verwendung von Lichtleiterbündeln aus nicht parallelen Lichtleitfasern (1996)
[FrFö 97]	Friedrich, A.; Föhr, R.; Neddermeyer, W.; Armbruster, K.; Beye- rer, J.; Bröcher, B.:	Beispiele industrieller Bildverarbeitung. atp-Automatisierungstechnische Praxis. 39 (1997) 4, R. Oldenbourg Verlag München, S. 22-33
[Fu 94]	Fuhrmann, J. U.:	US-Marktforscher sehen in der Mikrosystemtechnik ein immenses Marktpotential. Sensor Magazin April 1994, S. 5-7
[Ge 95]	Gerhard, E.:	Faseroptische Sensoren in der Medizintechnik. Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 22, 1995
[GeDö 97]	Gerlach, G.; Dötzel, W.:	Grundlagen der Mikrosystemtechnik. Carl Hanser Verlag München 1997

[GeEn 98]	Gengenbach, U.; En- gelhardt, F. u.a.:	Montage hybrider Mikrosysteme. Tagungsband vom 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtech- nik, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998, S. 17-24
[GöHe 94]	Göpel, W.; Hesse, J.; Zemel, J. N.:	Sensors. Vol. 7: Mechanical Sensors, VCH Verlags- gesellschaft mbH Weinheim 1994, S. 59ff und S. 146ff
[Ha 99]	Hantrop, C.:	Marktpotential ist nicht ausgeschöpft. VDI-Nachrichten, 16.07.99
[He 99]	Hecht, E.:	Optik. 2. Aufl., R. Oldenbourg-Verlag 1999
[HeMa 89]	Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.:	Physik für Ingenieure. 2. Aufl., VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989
[HePi 97]	Hesselbach, J.; Pitt- schellis, R.:	Miniaturgreifer mit Greifkraftmessung für die Mi- kromontage. VDI Berichte 1315, 1997, S. 335-348
[HoDe 10]	Hondros, D.; Debye, P.:	Elektromagnetische Wellen an dielektrischen Dräh- ten. Ann. Phys., Vol 32, 1910, pp. 465-476
[Hü 98]	Hümmler, J.:	Mikroproduktionstechnik im Großkammer-Raster- elektronenmikroskop. Dissertation RWTH Aachen. Shaker Verlag 1998
[Ja 96]	Janssen, B.:	Material und Prozeßentwicklung entscheiden über den Markterfolg. VDI-Nachrichten Nr. 16, 19.04.96
[Ka 94]	Kaplan, H.:	A Borescope That Behaves Like the Human Eyes. Photonics Spectra, September 1994, pp. 46-47
[KaHo 66]	Kao, K. C.; Hock- ham, G. A.:	Dielectric-fibre surface waveguides for optical fre- quencies. Proc. IEE, Vol. 113, 1966, pp. 1151-1158
[K1K1 96]	Klocke, V.; Klein- diek, St.:	Atomare Präzision und Millimeter-Hub. F&M 4/96, Carl Hanser Verlag, München

[LuYo 99]	Lu, Z.; Yoneyama, T.:	Micro cutting in the micro lathe turning system. In- ternational Journal of Machine Tool & Manufacture 39 (1999), Elsevier Science Ltd., pp. 1171-1183
[Ma 99]	Kui Ma, M. E.:	Greif- und Fügekraftmessung mit faseroptischen Sen- soren in der Mikromontage. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Vulkan-Verlag Essen, 1999
[MeBl 93]	Menz, W; Bley, P.:	Mikrosystemtechnik für Ingenieure. VCH Verlagsge- sellschaft Weinheim 1993
[MeVe 98]	Metev, S. M.; Vei- ko, V. P.:	Laser-Assisted Microtechnology. Springer-Verlag Berlin, 1998
[MST 97a]	N.N.:	Medical Applications. mst news, February 1997
[MST 97b]	N.N.:	Automotive Applications. mst news, May/June 1997
[MST 98]	N.N.:	Communication Technology. mst news, April 1998
[NEX 98]	N.N.:	Market Analysis for Microsystems 1996-2002. A NEXUS Task Force Report, October 1998
[Pe 99]	Petersen, B.:	Flexible Greifwerkzeuge in der Präzisions- und Mi- kromontage. Fraunhofer-IPT Jahresbericht 1999, S. 26
[Pe 00]	Petersen, B.:	Arbeits- und Ergebnisbericht des SFB 440: Montage hybrider Mikrosysteme für den ersten Antragszeit- raum. Teilprojekt A1, 1997-2000
[Pf 98]	Pfeifer, T.:	Fertigungsmeßtechnik. R. Oldenbourg Verlag Mün- chen Wien, 1998

[PfBr 96]	Pfeifer, T.; Bröcher, B.:	Neue Perspektiven bei faseroptischen Multisensorsy- stemen. Vortrag: VDI/VDE-GMA Fachtagung Senso- ren und Meßsysteme, 1113.3.96 Bad Nauheim. In: VDI-Berichte 1255, VDI Verlag Düsseldorf 1996, S. 31-36
[PfBr 97a]	Pfeifer, T.; Bröcher, B.:	Process Control for Assembling Microsystems. Vor- trag, 9-IPES/UME 4, 2630.5.1997 Braunschweig. In: Kunzmann et al. (Hrsg.): Progress in Precision Engineering and Nanotechnology. PTB Braun- schweig 1997, S. 61-63
[PfBr 97b]	Pfeifer, T.; Bröcher, B.:	Multi-Sensor System for an Automatic Assembly Process. Vortrag, Symposium on Handling and As- sembly of Microparts, 2829.11.1997 Wien. In: Det- ter (Hrsg.): Proceedings. Verleger: Österreichische Tribologische Gesellschaft, S. 19-24
[PfBr 98]	Pfeifer, T.; Bröcher, B.:	Prozeßüberwachung bei der Montage hybrider Mi- krosysteme. Poster, ITG-Fachtagung Sensoren und Meßtechnik, 911.3.1998 Bad Nauheim. In: ITG-Fachbericht 148, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach 1998, S. 421-426
[PfDu 98]	Pfeifer, T.; Dussler, G.; Bröcher, B.:	Observation of the Microassembly Process with a Confocal Laser-Scanning-Microscope. Poster, 6 th International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems an Components, 13.12.98 Potsdam. In: Reichl, H., Obermeier, E. (Hrsg.): Micro System Technologies 98, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach 1998, S. 621-623

[PfDu 99]	Pfeifer, T.; Dussler, G.;	Mikrowelten im Fokus. F&M 107 (1999) 5, Carl
	Brocher, B.:	Hanser Verlag, Munchen S. 55-57
[PfDu 00]	Pfeifer, T.; Dussler, G.; Bröcher, B.:	Prozeßüberwachung und Prüftechnik bei der Produk- tion von Mikrosystemen. Vortrag, VDI/VDE-GMA Fachtagung Sensoren und Meßsysteme 2000, 1314. März 2000 Ludwigsburg. In: VDI- Berichte 1530, VDI-Verlag Düsseldorf 2000, S. 221-230
[PfEi 94]	Pfeifer, T.; Eikel- mann, E.:	Fiber-optic reflex sensors for industrial applications. Measurement 12, 1994, pp. 291-304
[PfFr 99]	Pfeifer, T.; Freuden- berg, R.; Dussler, G.; Bröcher, B.:	The need of new devices and methods for quality control and process observation in MEMS. Proceed- ings of the IMEKO – XV World Congress – volume IX, Osaka 1999 In: Imai, H.: Measurement to Im- prove the Quality of Life in the 21 st Century, S.93 – 96
[PfWi 97]	Pfeifer, T.; Wiegers, L.; Bartelt, V.; Bröcher, B.:	Einsatz der Bildverarbeitung zur integrierten Prozeß- überwachung in Werkzeugmaschinen. at-Automatisierungstechnik. 45 (1997) 10, R. Olden- bourg Verlag München, S. 508-514
[Po 99]	N.N.:	Datenblatt "CORVIS.EndosTop" der Firma Poly- Diagnost, Pfaffenhofen
[PoPo 97]	Pontani, B.; Ponta- ni, M.:	Automatische Mikromontage ist machbar. F&M 105 (1997) 6, Carl Hanser Verlag, S. 443-446
[Re 88]	Reling, J.:	Industrielle Endoskopie. Verlag Moderne Industrie AG&Co., Landsberg/Lech 1988

[ReBr 99]	Reynaerts, D.; van Brussel, H.; Meeu- sen, W.; Song, X.:	A Review on Micro Electro Discharge Machining of Metal and Silicon. Proceedings of the 1 st Inter- national euspen Conference, volume 2, May 31 st – June 4 th 1999, Bremen, Germany, pp. 24-31
[ReHö 97]	Reinhart, G.; Höhn, M.:	Flexible Montage von Miniaturbauteilen. F&M 105 (1997) 1-2, Carl Hanser Verlag München, S. 43-45
[RiSc 99]	Riemer, O.; Schmütz, J.:	Kleinste Strukturen und winzige Späne. F&M 107 (1999) 9, Carl Hanser Verlag München, S. 55-58
[Sa 98]	Santa, K.:	Intelligente Regelung von Mikrorobotern in einer automatisierten Montagestation. Dissertation Univer- sität Karlsruhe, 1998
[Sc 90]	Schröder, G.:	Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen. 7. Auflage. Vogel Verlag Würzburg, 1990
[ScGr 99]	Schünemann, M.; Grimme, R. u.a.:	Automatisierte Montage und Justage von Mikrokom- ponenten. wt Werkstattechnik 89 (1999) H4, S.159-163
[SEMI 96]	N.N.:	Micromachine sales to grow 50% a year, to nearly \$10 billion by 2000. Micromachine Devices 1 (1996), pp. 1-2
[ShUt 85]	Shintani, T.; Utsu- mi, A.:	Silica Glass Imageguides and Their Applications. Jarect Vol. 17, Optical Devices & Fibers (1985/1986) Ohmsha Ltd, 1985
[SpBr 98]	Spaniol, St.; Brö- cher, B.:	Bildleiterintegration bei Miniatur-Laserendoskopen. Vortrag, Satellitensymposium und Ausstellung im Rahmen des XXVIII. Kongresses der Gesellschaft für Endoskopie und bildgebende Verfahren (DGE-BV), 25.3.98 München. In: Tagungsunterlagen
[SPC 94]	N.N.:	MicroElectroMechanical Systems (MEMS) – An SPC Market Study. Arlington Virginia USA, 1994
-----------	---------------------------------------	--
[StGr 98]	Staud, J.; Groß, W.; Menschig, A.:	Sensitive and Adaptive Manipulators for Automation of Micro Assembly. In: Reichl, H.; Obermeier, E. (Hrsg.): Micro System technologies 98. 6 th Interna- tional Conference on Micro-, Electro-, Opto-, Mecha- nical Systems an Components. Potsdam, December 1-3 1998, pp. 231-236
[Sum 97]	N.N.:	Datenblatt der Sumitomo Electric Industries, Ltd., Yokohama, Japan 1997
[Ta 99]	Taeymans, D.:	CMOS oder CCD. F&M 106 (1998) 4, Carl Hanser Verlag, München, S. 251-254
[Th 97]	Thomas, R.:	Realism and surrealism in market forecasts. Micro- machine Devices 8 (1997), pp. 7-8
[VDI 96]	N.N.:	Präzise optische Bearbeitung von Festkörpern. Hrsg: VDI Technologiezentrum Physikalische Technologi- en, Laser in der Materialbearbeitung Band 5, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1996
[VDI 97]	N.N.:	Zukunftstechnologie ohne Markt. VDI Nachrichten Nr. 46, 14.11.97
[We 98]	Weck, M.:	Mikrosystemtechnik – eine Chance für den Klein- und Mittelstand? Werkstattechnik, Band 88, 1998, S. 7
[WeEl 98]	Wechsung, R.; Eloy, J. C.:	Market analysis for Microsystems – an interim report from the NEXUS task force. 4 th World Micromachine Summit, April 29 – May 1, Melbourne Australia, 1998

[WeHo 96]	Westkämper, E.; Hoff-	Spanende Mikrofertigung. F&M 104 (1996) 7-8,
	meister, HW.; Gäb-	Carl Hanser Verlag, München S. 525-530
	ler, J.:	
[Ze 95]	N.N.:	ULTRA Objective. Firmenschrift der Carl Zeiss Jena
		GmbH und der Surface Imaging Systems, 1995
[ZüFi 96]	Zühlke, D.; Fischer, R.;	Schrittweise in die automatisierte Mikromontage.
	Hankes, J .:	F&M 104 (1996) 9, Carl Hanser Verlag, München
		S. 627-630

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Benno Bröcher
Geburtsdatum:	27. November 1968
Geburtsort:	Olpe
Familienstand:	verheiratet, zwei Kinder
Eltern:	Siegfried Bröcher und Margret Bröcher, geb. Ochel

Schulausbildung

1975 – 1979	Katholische Grundschule in Ottfingen
1979 – 1988	St. Franziskus Gymnasium in Olpe
	Zeugnis der allgemeinen Hochschulreife vom 30. Mai 1988

Wehrdienst

1988 – 1989	Grundwehrdienst bei der Fernmeldekompanie 2 in Frankenberg	/ Eder

Studium

1989 – 1995	Studium der Elektrotechnik, Fachrichtung Allgemeine Elektrotechnik
	an der RWTH Aachen
	Diplomprüfungszeugnis vom 20. März 1995

Berufstätigkeit

1992	Fachpraktikum bei der Siemens AG in Witten
1994	Fachpraktikum bei Philips GmbH Glasfabrik in Aachen
seit 1995	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium für Werkzeugma-
	schinen und Betriebslehre (WZL) der RWTH Aachen
	Lehrstuhl für Fertigungsmeßtechnik und Qualitätsmanagement,
	Leitung: Prof. DrIng. Dr. h.c. Prof. h.c. Tilo Pfeifer