

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage
optischer Mikrokomponenten**

Tobias Zeilinger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg

Die Dissertation wurde am 05.04.2012 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 02.10.2012 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

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

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, dem Leiter des Lehrstuhls für Photonische Technologien, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts recht herzlich für die sehr gute, oft begeisterte Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich dabei Michael Loy, Mirko Langhorst, Jakob Kurfer und Markus Westemeier, die mich geprägt und bei meiner Arbeit am Institut immer unterstützt haben. Bei den Studenten, die meine Forschung in Form von Studienarbeiten begleitet haben, bedanke ich mich für ihr Interesse und Engagement.

Des Weiteren geht mein Dank an meine Kollegen Thomas Kirchmeier, Andrea Reiter und Markus Schweier sowie allen voran an meine Tante Dr. Christine Feil, die das Manuskript kritisch begutachtet und viele wertvolle Anregungen beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt zudem meinen Eltern Peter und Barbara, meiner Schwester Stefanie und allen meinen Freunden, die immer an mich geglaubt haben und mir so den nötigen Rückhalt für diese Arbeit gegeben haben. Meine Freunde Roland, Fabian, Dominik, Helmi und Florian haben stets dafür Sorge getragen, dass ich in ihrer Gegenwart garantiert nicht an meine Promotion gedacht habe.

Vor allem aber möchte ich mich bei meiner Freundin Katarina bedanken. Dafür, dass ich mit so einer wunderbaren Frau zusammen sein darf.

München, im Oktober 2012

Tobias Zeilinger

“Gotta use your brain, it's the most important part of your equipment.”

Warren Miller

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	iv
Formelzeichen	vi
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Stand der Technik in der Mikromontage	5
2.1 Begriffsdefinitionen.....	5
2.1.1 Mikrosystemtechnik	5
2.1.2 Monolithische Mikrosysteme	7
2.1.3 Hybride Mikrosysteme	7
2.1.4 Mikro- und Präzisionsmontage.....	9
2.2 Automatisierte Mikromontagesysteme.....	11
2.2.1 Grundlegender Systemaufbau	11
2.2.2 Unterschiede zu Makromontagesystemen	13
2.2.3 Positioniersysteme.....	14
2.2.4 Endeffektoren	19
2.2.5 Standardtechnologien zur Bestimmung der Bauteillage	25
2.3 Methoden zur hochgenauen Relativpositionierung	31
2.3.1 Sensorübergreifende Positionierungsstrategien	31
2.3.2 Eigenausrichtung	32
2.3.3 Falt- und Klapptechniken	34
2.3.4 On-the-machine-assembly.....	35
2.3.5 Preadjusted assembly magazines.....	36
2.3.6 Stereophotogrammetrie	36
2.3.7 Infrarot-Durchlicht	37
2.3.8 Lagebestimmung auf Basis von CAD-Daten	38
2.3.9 Diametrale Bildüberlagerung	40
2.3.10 Dreistrahlinterferometer	41
2.3.11 Laser-Marker-Erkennung	42

3 Defizite herkömmlicher Positionierkonzepte, Handlungsbedarf und Zielsetzung	45
3.1 Überblick	45
3.2 Herausforderungen bei der Montage MOEMS-basierter Systeme.....	45
3.2.1 Positionierung in sechs räumlichen Freiheitsgraden.....	45
3.2.2 Eingeschränkte optische und taktile Zugänglichkeit.....	46
3.2.3 Detektion fügeferner Positionsreferenzen	47
3.3 Nachteile existierender Sensorsysteme	48
3.4 Handlungsbedarf.....	51
3.5 Zielsetzung der Arbeit	53
4 Relevante Grundlagen der Lasermesstechnik	55
4.1 Ausbreitung und Charakterisierung von Laserstrahlen	55
4.1.1 Strahlpropagation und Intensitätsverteilung.....	55
4.1.2 Fokussierung.....	57
4.2 Messtechnik zur Bestimmung der Position des Brennflecks	59
4.2.1 Charge-coupled Device	59
4.2.2 Position-Sensitive-Detector.....	61
4.2.3 Vier-Quadranten-Photodiode	62
5 Mathematische Grundlagen	65
5.1 Überblick und Einordnung	65
5.2 Trust-Region-Verfahren zur numerischen Lösung von Gleichungssystemen	65
5.3 Evolutionäre Optimierungsverfahren	67
5.3.1 Einführung und Begriffsdefinitionen	67
5.3.2 Struktur und Aufbau	68
5.3.3 Genetische Algorithmen.....	69
5.3.4 Genetische Programmierung	71
5.3.5 Evolutionsstrategien	72
5.3.6 Evolutionäre Programmierung	74
6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel	77
6.1 Sensorkonzept zur Laserreflexiven Positionierung	77
6.1.1 Randbedingungen	77
6.1.2 Konzept und Funktionsweise	78
6.2 Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung.....	81
6.2.1 Reflexionsmusterberechnung	81

6.2.2	Diskussion des Reflexionsmusters	88
6.3	Algorithmen zur Positionsberechnung	92
6.3.1	Eingangsgrößen	92
6.3.2	Lösung auf Basis analytisch-numerischer Methoden.....	92
6.3.3	Lösung auf Basis genetischer Optimierung.....	108
6.4	Zusammenfassung	131
7	Validierung der Methoden und Simulationen	133
7.1	Anwendungsbeispiel Mikros scanner für Laservibrometer	133
7.1.1	Demonstrator	133
7.1.2	Montageaufgabe	135
7.2	Versuchsstand.....	138
7.2.1	Grundlegender Aufbau	138
7.2.2	Kalibrierung und Fehlerkompensation	141
7.3	Positionierungsversuche	145
7.3.1	Validierung der Reflexionsmusterberechnung.....	145
7.3.2	Integration der Algorithmen.....	148
7.3.3	Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	151
8	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit	159
8.1	Technische Integration	159
8.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	161
8.2.1	Betrachtungsraum.....	161
8.2.2	Kostenrechnung.....	161
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	169
	Abbildungsverzeichnis.....	173
	Tabellenverzeichnis.....	178
	Literatur.....	179

Abkürzungen

ared	Actual Reduction
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BV	Bildverarbeitung
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DA/AD-Wandler	Digital-Analog/Analog-Digital-Wandler
DAQ	Data Acquisition
DK-Fehler	Drehachsenkompensierter Positionsfehler
EP	Evolutionäre Programmierung
ES	Evolutionsstrategien
FGL	Formgedächtnislegierung(en)
GA	Genetische Algorithmen
G-N	Gauß-Newton
GP	Genetische Programmierung
He	Helium
IMT	Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig
IO	Input-Output
IOF	Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik
IR	Infrarot
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig
IZM	Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration
KOS	Koordinatensystem

LIGA	Lithographie, Galvanik und Abformung
L-M	Levenberg & Marquardt
LRP	Laserreflexive Positionierung
LVM	Laservibrometer
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MeMo	Mechatronische Montage
MEMS	Mikroelektromechanisches System
MIS	Metall-Isolator-Halbleiter-Struktur
MMS	Mikromontagesystem
MOEMS	Mikro-opto-elektromechanisches System
MP	Messpunkt
MST	Mikrosystemtechnik
Ne	Neon
NI	National Instruments
PC	Personal Computer
pred	Predicted Reduction
PSD	Position Sensitive Detektor, Positionssensitiver Detektor
Q4D	Vier-Quadranten-Photodiode
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SPP	Strahlparameterprodukt
SU-Einheit	Strahlumlenkeinheit
SW	Software
TAB	Tape-Automated-Bonding
TCP	Tool Center Point
TEM, TE-Mode	Transversale elektromagnetische Mode
TR	Trust Region
UV	Ultraviolett

Formelzeichen

Griechische Symbole

$\vec{\Delta}_i$	Abweichung des Individuenvektors vom Optimum
Δ_k	Radius des Vertrauensbereichs (trust-region-radius)
$\Delta(xyz)_{DK}$	Drehachsenkompensierter Positionsfehler
$\Phi_k(d)$	Funktionsmodell, angenähert durch ein Taylorpolynom
α_s	Eulerwinkel des Spiegelkoordinatensystems (erste Drehung)
β_s	Eulerwinkel des Spiegelkoordinatensystems (zweite Drehung)
γ_s	Eulerwinkel des Spiegelkoordinatensystems (dritte Drehung)
δ	Winkel um z bei Projektion der Spiegeldrehachse in die x-y-Ebene
ε_s	Winkelamplitude der Spiegelschwingung
θ	Kugelkoordinatenwinkel um z
θ_{SD}	Strahlöffnungswinkel, Divergenz
λ	Größe der Nachkommenpopulation
λ_l	Wellenlänge
μ	Größe der Elternpopulation
σ_{Winkel}	Mutationsschrittweiten der rotatorischen Freiheitsgrade
σ_{XYZ}	Mutationsschrittweiten der translatorischen Freiheitsgrade
$\sigma_{j,k}$	Mutationsschrittweite
$\sigma'_{j,k}$	Angepasste Mutationsschrittweite (mutiert)
τ_1, τ_2	Strategieparameter für die Mutation
φ	Kugelkoordinatenwinkel um y

Lateinische Symbole

A	Numerische Apertur
A_M	Montageflächenbedarf
B_K	Betriebskosten Reinraum

BW	Beschaffungswert
E_S	Spiegelebene
E_Z	Jährliche Arbeitszeit
E_{mn}	Transversale elektromagnetische Mode der Ordnung m, n
$F(\vec{x})$	Fitnesswert eines Individuums
I_0	Strahlungsintensität im Strahlzentrum
I_K	Konfidenzintervall
$I(r)$	Lokale Strahlungsintensität
K_A	Abschreibungskosten
K_{AH}	Arbeitsstundensatz Montageanlagen
K_B	Bedienerkostensatz
K_E	Energiekosten
K_I	Instandhaltungskosten
K_I	Instandhaltungskostensatz
K_{MH}	Maschinenstundensatz
K_R	Raumkosten
K_{ST}	Strompreis
K_Z	Kalkulatorische Zinskosten
L	Geradengleichung Laserstrahl
MP^x	x-Koordinate Messpunkt
MP^y	y-Koordinate Messpunkt
N_F	Standardnutzungsfaktor
P_N	Nennleistung
P_d	Mittelpunkt des optischen 2D-Sensors (Detektor)
P_f	Fehlerwahrscheinlichkeit
P_l	Ursprungspunkt des Lasers
P_s	Mittelpunkt des Spiegels und Ursprungspunkt des Spiegelkoordinatensystems
Q	Quantil

Formelzeichen

R_{PSD}	Anordnungsradius PSD-Sensoren
SPP	Strahlparameterprodukt
U	Auflösungsvermögen
U_s	Steuerspannung des Spiegels
V	Verfügbarkeit
$c(x)$	Cosinus(x)
d	Iterationsschrittweite Trust-Region-Verfahren
d_C	Cauchy-Anteil der Iterationsschrittweite (Trust-Region-Verfahren)
d_L	Laserdurchmesser im Linsendurchgang
d_f	Strahltaillendurchmesser
f	Brennweite
$g(x), \nabla f(x)$	Funktionsgradient
m_i, n_i, l_i	Strahlabhängige Substitutionsterme
n_G	Anzahl Generationen
r_k	Funktionsreduktionsquotient
$s(x)$	Sinus(x)
w_0	Strahltaillenradius
$w(z)$	Lokaler Strahlradius
x_P	x-Koordinate des Laserauftreffpunkts auf dem Sensor
y_P	y-Koordinate des Laserauftreffpunkts auf dem Sensor
z_R	Rayleigh-Länge
z_e	Gegenstandsweite
z_f	Fokusabstand zur Linse

Matrixbezeichnungen

$\bar{\mathbf{A}}$	Populationstensor der Ausgangspopulation
$\mathbf{B}^T, \mathbf{H}(x), \nabla^2 f(x)$	Hesse-Matrix
\mathbf{M}_{xyz}	Transformationsmatrix von dem Spiegelkoordinatensystem in das Globalkoordinatensystem

$\bar{\mathbf{P}}$	Populationstensor
\mathbf{R}	Reflexions-Rotationsmatrix

Vektorgrößen

\vec{P}_{LD}	Laserauftreffpunkt auf dem Sensor
\vec{P}_{LS}	Laserauftreffpunkt auf dem Spiegel
\vec{d}_R	Reflexionsdrehvektor
\vec{d}_s	Drehachse des Spiegels
\vec{n}_d	Normalenvektor des optischen 2D-Sensors (Detektor)
\vec{n}_s	Spiegelnormalenvektor in Spiegelkoordinaten
\vec{n}_{s_G}	Spiegelnormalenvektor in Globalkoordinaten
\vec{n}_{s0}	Normalenvektor des Spiegels in Nullstellung
\vec{k}	Wellenzahlvektor
\vec{v}_l	Vektor des Laserstrahls vom Ursprungspunkt
\vec{x}_i	Individuum (Individuenvektor)
\vec{x}'_j	Mutiertes Individuum (Individuenvektor)
\vec{x}_{opt}	Optimales Individuum (Individuenvektor)

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Mitte der siebziger Jahre zeigten erste Versuche mit Fertigungsverfahren aus der Mikroelektronik, dass sich diese nicht nur zur Herstellung mikroelektronischer Schaltkreise, sondern auch zur Fertigung miniaturisierter mechanischer und optischer Systeme eignen (BRYCEK ET AL. 1994; ELDERS ET AL. 2001). Diese Erkenntnis war die Grundlage für die Mikrosystemtechnik und führte zu einer nahezu unüberschaubaren Bandbreite an neuen Entwicklungen in den Bereichen Sensortechnik, Optik und Aktorik. Damit eröffneten sich vollkommen neue Möglichkeiten für die Umsetzung technischer Systeme, die die Mikrosystemtechnik bis zur Jahrtausendwende in nahezu allen Lebensbereichen der Menschen westlicher Industrienationen etablieren sollte. Eine Vielzahl von Produkten wird seitdem mit Mikrosystemen ausgestattet mit dem Ziel, die Produkte immer kleiner, leichter, intelligenter, sicherer, günstiger, komfortabler und leistungsfähiger zu machen. Neben einer umfassenden Verbesserung bestehender Systeme entstanden auch gänzlich neue Lösungen, wie beispielsweise endoskopische Operationsmethoden in der Medizintechnik (Bild 1-1, links) (LUTZE ET AL. 2004), Datenspeichersysteme heutiger Festplatten (CHEN ET AL. 2005) oder optische Datenübertragungsmethoden in der Informationstechnik (Bild 1-1, rechts) (HILLERINGMANN 2006).

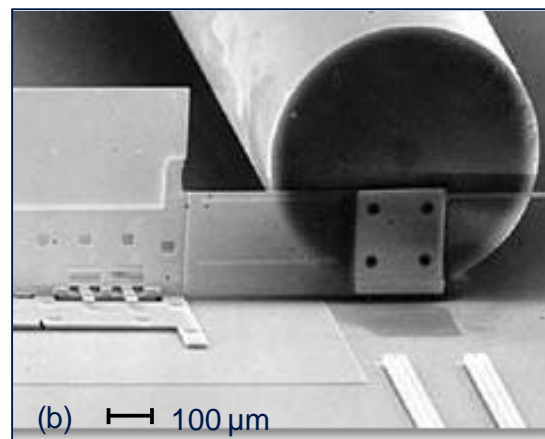
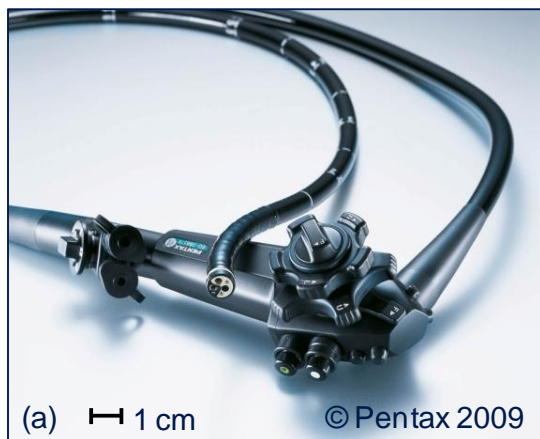


Bild 1-1: Beispiele für Innovationen durch die Mikrosystemtechnik: (a) Endoskop (zur Verfügung gestellt von Pentax GmbH, Hamburg 2009); (b) Schalter für die optische Datenübertragung basierend auf einem beweglichen Mikrospiegel (BISHOP ET AL. 2001)

Bedingt durch ihre wachsende wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung entwickelte sich die Mikrosystemtechnik zu einer der Schlüsseltechnologien des beginnenden 21. Jahrhunderts (NEXUS 2005). Der internationale technologische und

1 Einleitung

ökonomische Wettlauf führte dazu, dass in Deutschland bis heute erhebliche Summen in die Erforschung und Entwicklung von Mikrosystemen und deren Fertigungstechnologien investiert werden. Nicht zuletzt deshalb gehört Deutschland zu den weltweit führenden Forschungs- und Produktionsstandorten im Bereich der Mikrosystemtechnik (VDE 2009).

Die zunehmende Miniaturisierung technischer Systeme sowie die Erhöhung ihrer Integrationsdichte, also die steigende Anzahl von Funktionen pro Volumen, stellen vor allem die Produktionstechnik vor neue Herausforderungen. Mikrosysteme der ersten Generation, die bis Ende der 1990-er Jahre auf den Markt kamen, verfügen lediglich über sehr eingeschränkte mechanische Funktionen. Diese Systeme sind zum Großteil monolithisch aufgebaut, d.h., sie bestehen aus einem zusammenhängenden Teil und werden aus einem einzigen Werkstoff gefertigt (HILLERINGMANN 2006). Monolithische Systeme können sehr gut mithilfe abtragender oder generativer, teilweise aus der Mikroelektronik stammender, Technologien gefertigt werden (HSU 2004; BEIL 2002). Anfang dieses Jahrtausends erschienen wesentlich weiterentwickelte Mikrosysteme der zweiten und dritten Generation auf dem Markt, die mechanische, optische und elektronische Funktionen auf wenigen Kubikmillimetern konzentrieren. Viele dieser mikro-opto-elektromechanischen oder mikroelektromechanischen Systeme, kurz MOEMS oder MEMS, können funktionsbedingt nicht aus einem einzigen Teil hergestellt werden. Der räumlich komplexe Aufbau und die Verwendung unterschiedlicher Materialien mit verschiedensten Oberflächeneigenschaften erfordern die Integration einzeln gefertigter Baugruppen (EHRFELD ET AL. 1993; FATIKOW 2000; YANG ET AL. 2005). Die Entwicklung neuer Mikrofertigungstechnologien, wie das Heißprägen von Mikrostrukturen (HACKELE ET AL. 1994; GERLACH ET AL. 2002), das Mikrospritzgießen (MICHAELI ET AL. 1998), die Mikrosterolithographie (GÖTZEN 1998), die Laserstrukturierung (GILLNER 2000) oder die Mikrozerspannung (AURICH ET AL. 2009), erweiterte das Spektrum technisch umsetzbarer Mikrokomponenten und die Bandbreite einsetzbarer Materialien.

Bei der Montage neuerer MOEMS- oder MEMS-basierter Produkte ist vor allem die Automatisierungstechnik gefordert. Der Mensch stößt wegen der geringen Bauteildimensionen und der erforderlichen hohen Positioniergenauigkeit an die Grenzen seiner optischen, motorischen und taktilen Fähigkeiten. Bereits 1997 postulierte FISCHER (1997), dass in der Mikrosystemtechnik *„mittelfristig keine Alternative zur automatisierten Montage existiert“*. CECIL ET AL. (2007) bestätigten 2007 diese These, indem sie die Notwendigkeit automatisierter sensorgestützter Mikromontagesysteme erneut betonten.

Heute gibt es leistungsfähige Präzisionsroboter und Montagesysteme, die in der Lage sind, ein breites Spektrum an MOEMS- und MEMS-basierten Produkten auto-

matisiert zu montieren (RATCHEV ET AL. 2008). Im Zuge der darauf ausgerichteten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hat sich gezeigt, dass vor allem die Sensortechnologie der Produktionsanlagen eine Schlüsselrolle bei der erfolgreichen Mikromontage spielt (VAN BRUSSEL ET AL. 2000; HESSELBACH ET AL. 2008). Die Erfassung von Bauteilpositionen und der zugehörigen Positionsreferenzen ist entscheidend für die erreichbare Montagequalität. Hier besteht nach wie vor Forschungsbedarf, da existierende Positionierungssensoren – besonders bei der Montage optischer Mikrosysteme – unzureichend arbeiten (REINHART ET AL. 2009A). Vor allem die Positionierung von Mikrolinsen und Mikrospiegeln liegt im Fokus aktueller Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten (EBERHARDT ET AL. 1997; SHEN ET AL. 2003). Die hochpräzise Ausrichtung und Montage von Mikrolinsen konnte bereits mehrfach erfolgreich durchgeführt werden (SCHUENEMANN ET AL. 1997; EBERHARDT ET AL. 1999; MIESNER ET AL. 2009). Bei der Montage beweglicher Mikroschwingspiegel allerdings herrscht ein Mangel an geeigneten Strategien zur Erfassung der Position funktionsrelevanter optisch reflektierender Oberflächen (HANE ET AL. 2008; REINHART ET AL. 2009B).

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es eine lasergestützte Methode zur berührungslosen, bauteilindividuellen Lagebestimmung der Funktionsflächen beweglicher Mikroschwingspiegel zu entwickeln. Aufbauend auf der Methode soll eine Sensorik umgesetzt werden, die – im Unterschied zu herkömmlichen Sensorsystemen – die Lagebestimmung von Mikroschwingspiegeln bezüglich fugefernen Positionsreferenzen trotz der für viele MOEMS typischen, eingeschränkten optischen und taktilen Bauteilzugänglichkeit ermöglicht. Die Positionsbestimmung soll unmittelbar im Montageprozess mit einer Genauigkeit von unter 5 μm durchgeführt werden können.

Im Rahmen der theoretischen Betrachtungen ist die Methode mit allen physikalischen, mathematischen und technischen Randbedingungen darzustellen. Algorithmen zur Auswertung des Lasersignals sind zu entwickeln. Schließlich ist der prinzipielle Funktionsnachweis von Methode und Algorithmen durch eine Simulation zu erbringen. Bei der Algorithmenentwicklung sollen im Speziellen mögliche mathematische Ansätze identifiziert und hinsichtlich ihrer Laufzeit und Konvergenz bewertet, verglichen und weiterentwickelt werden.

Zur Validierung der theoretischen Untersuchungen sollen eine technische Lösung zur Integration der Sensorik in ein Montagesystem erarbeitet und ein Versuchsstand aufgebaut werden, der die Bauteilpositionierung bei der automatisierten Montage eines Mikrosensors für Laservibrometer abbildet. In Positionierungsversuchen ist

dann die Anwendbarkeit der Algorithmen zu prüfen und deren tatsächliche Genauigkeit mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. Dabei ist auch die Wirtschaftlichkeit des Sensorsystems für die Serienfertigung abzuschätzen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Anknüpfend an die in Kapitel 1 skizzierte Ausgangssituation und die aufzuklärenden Forschungsfragen wird in Kapitel 2 zunächst ein umfassender Überblick über relevante Technologien und Begrifflichkeiten der automatisierten Mikromontage gegeben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Vorstellung von *Positionierungsstrategien und Sensortechnologien zur Bestimmung der Bauteillage*.

Darauf aufbauend wird in *Kapitel 3* gezeigt, dass die *Positionierung in sechs räumlichen Freiheitsgraden*, die *eingeschränkte optische und taktile Zugänglichkeit* und die *Detektion fügeferner Positionsreferenzen* die Kernprobleme bei der Positionierung optischer Mikrokomponenten in der automatisierten Montage sind und dass diese Probleme nicht oder nur unzureichend von existierenden Sensortechnologien adressiert werden. Ausgehend von der Charakterisierung dieser Kernprobleme werden ein konkreter Handlungs- und Forschungsbedarf abgeleitet sowie Zielsetzung und Vorgehen der vorliegenden Arbeit ausführlich vorgestellt.

In *Kapitel 4* und *Kapitel 5* sind wichtige *lasermesstechnische und mathematische Grundlagen* zusammengefasst, die Voraussetzung für die Entwicklung einer neuen Positionierungsstrategie sowie deren mathematische Modellierung, Simulation und technische Umsetzung sind.

Abgeleitet aus Forschungsbedarf und Zielsetzung wird in *Kapitel 6* die *Methode der Laserreflexiven Positionierung (LRP)* zur Lagebestimmung optischer Mikrobauteile bei der automatisierten Montage vorgestellt. Die grundlegende Methodik wird erklärt und es wird gezeigt, wie die LRP die Kernprobleme der Montage hybrider optischer Mikrosysteme löst. Im Anschluss an die Darstellung der wissenschaftlich technischen Herausforderungen der Methode werden geeignete mathematische Algorithmen zur Positionsbestimmung entwickelt und untersucht.

Kapitel 7 skizziert mit der Montage eines Mikrosanners ein Anwendungsszenario für die Laserreflexive Positionierung und dokumentiert die *Umsetzung des Sensor-konzepts in einem Versuchsstand*. Anhand des Versuchs werden dann die theoretischen Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel validiert. Das Kapitel schließt mit einer *technisch ökonomischen Betrachtung* der LRP.

Das *letzte Kapitel fasst die Arbeit kurz zusammen* und gibt einen *Ausblick* auf weitere Einsatzgebiete und Potenziale der Laserreflexiven Positionierung.

2 Stand der Technik in der Mikromontage

2.1 Begriffsdefinitionen

2.1.1 Mikrosystemtechnik

In der Literatur finden sich unterschiedliche Interpretationen des Begriffs „Mikrosystemtechnik“ (MST). Den meisten Definitionen ist der Verweis auf die Interdisziplinarität der Technologie gemein (JACOB 2002). MENZ ET AL. (2005) bezeichnen die Mikrosystemtechnik als die Übertragung mikroelektronischer Technologien auf nicht-elektronische Bereiche. FLUITMANN (1994) beschreibt die Mikrosystemtechnik wie folgt: „Micro System Technology can be seen as the meeting of disciplines, a product of convergence along different lines. Apart from the traditional and ever developing line on ‘classical’ precision engineering, there is a line along microelectronics, microsensors and microactuators.“ Beschreibungen wie diese entsprechen zwar dem Charakter der Mikrosystemtechnik, geben aber keine einfache, anschauliche und gut verständliche Definition des Begriffs. FISCHER (1997) skizziert die Mikrosystemtechnik als „Verbindung der Mikroelektronik und der Mikrostrukturtechnik zum Aufbau kompletter, hochleistungsfähiger Systeme im Bereich weniger Mikrometer bis hin zu einigen Millimetern“. Er gibt damit eine technisch anschauliche und umfassende Definition, die mit geringfügigen Ergänzungen für die vorliegende Arbeit als gültig angesehen werden kann. Denn eine Betrachtung der Entwicklung der Mikrosystemtechnik und der steigenden Bedeutung hybrider Mikrosysteme zeigt, dass die Definition neben der Mikrostrukturtechnik und den damit verbundenen Fertigungstechnologien auch die Mikromontage und die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) mit einbeziehen muss. Dem entsprechend wird für diese Arbeit die MST wie folgt definiert:

Die Mikrosystemtechnik ist die Verknüpfung der Mikroelektronik und der Mikrostrukturtechnik zum Aufbau kompletter, hochleistungsfähiger Systeme im Bereich weniger Mikrometer bis hin zu einigen Millimetern. Für die Herstellung solcher Systeme kommen spezielle Mikrofertigungs- und Mikromontage- sowie Aufbau- und Verbindungstechnologien zum Einsatz.

Mikrosysteme bestehen meist aus optischen, mechanischen und elektronischen Komponenten, wobei jedes Teilsystem wiederum ein eigenes Mikrosystem darstellt (Bild 2-1). Die Einzelkomponenten sind in der Regel monolithisch aufgebaut und mittels Mikrofertigungsverfahren urformend hergestellt. Hier finden insbesondere die Lithographie, die Silizium-Mikromechanik, das LIGA-Verfahren sowie die Ult-

2 Stand der Technik in der Mikromontage

raprÄzisionsmikrobearbeitung Verwendung (MENZ ET AL. 2005). In EinzelfÄllen können mit diesen Verfahren auch komplette, eigenstÄndige Mikrosysteme aufgebaut werden. Beispiele für rein monolithisch aufgebaute Mikrosysteme sind Gierraten- oder Beschleunigungssensoren aus dem Automobilbereich (SEIDEL 2002). Im Gegensatz dazu lassen sich Mikrosysteme mit hoher Funktionsvielfalt oder heterogenem Materialmix gar nicht oder nur in sehr seltenen FÄllen monolithisch umsetzen. Mehrere monolithisch gefertigte Komponenten müssen dann zu einem Gesamtsystem zusammengebaut werden. Dabei wird zwischen der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und der Mikromontage unterschieden.

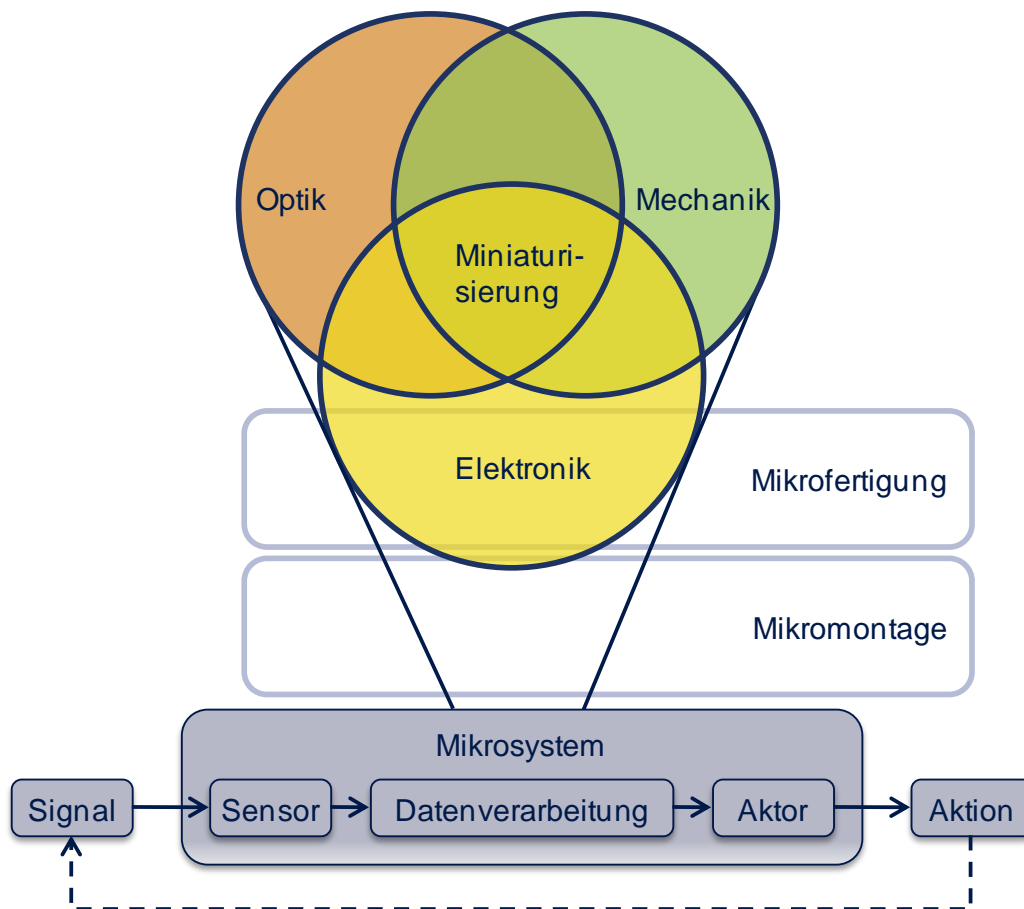


Bild 2-1: Die Mikrosystemtechnik in Anlehnung an FISCHER (1997)

Die AVT stammt ursprünglich aus der Halbleitertechnik und bezeichnet verschiedene BondvorgÄnge und „Pick-and-Place-Operationen“, mit denen Halbleitersubstrate mit Chips bestückt oder ebene Montageoperationen ausgeführt werden können. Die Mikromontage umfasst alle sonstigen Montageoperationen im Bereich der Mikrosystemtechnik (NIENHAUS 1999).

2.1.2 Monolithische Mikrosysteme

Nach MENZ ET AL. (2005) ist ein monolithisches Mikrosystem ein System, das „vollständig in einer Technologie auf einem Silizium-Chip gefertigt ist“. Monolithische Systeme vereinen hohe Zuverlässigkeit mit minimalem Bauraum bei verhältnismäßig geringen Herstellkosten für große Stückzahlen. Bild 2-2 zeigt das Modell eines Drehratensensors monolithischer Bauweise sowie lichtmikroskopische Aufnahmen des Sensors.

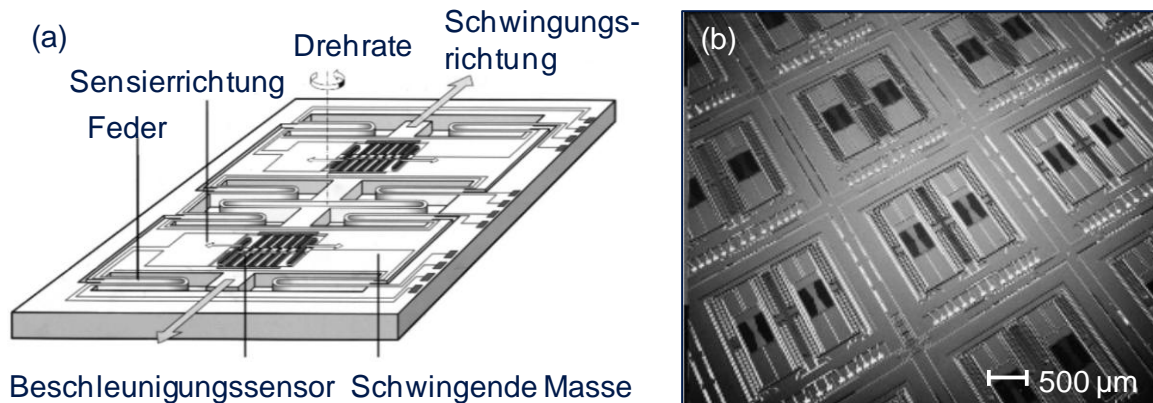


Bild 2-2: Drehratensensor monolithischer Bauweise (GERLACH ET AL. 2006): (a) dreidimensionales Modell; (b) Mikroskopaufnahme mehrerer Sensoren im Waferversbund

Aufgrund der hohen Komplexität der Produktionsverfahren ist die Ausbeute funktionsfähiger Mikrosysteme bei der Fertigung allerdings gering (HILLERINGMANN 2006). Monolithische Mikrosysteme werden meist mit generischen, ursprünglich aus der Halbleiterbranche stammenden Verfahren wie beispielsweise der Silizium-Mikromechanik, hergestellt (JACOB 2002).

Allerdings lassen sich nicht alle Funktionen in monolithischen Systemen umsetzen. Besonders in den Bereichen der Mikrooptik, Mikrofluidik und Analytik müssen Mikrosystemkomponenten in größere Systeme eingefügt oder mit weiteren mechanischen Strukturen verbunden werden (DILTNEY 2005). Auch bei der Integration anderer Materialien oder optisch aktiver Elemente, wie Glasfasern, Mikrospiegel oder Mikrolinsen, stoßen rein urformende Fertigungsverfahren an ihre Grenzen. So kann beispielsweise nur eine geringe Bandbreite an MOEMS monolithisch hergestellt werden (GERLACH ET AL. 2006).

2.1.3 Hybride Mikrosysteme

Hybride Mikrosysteme bieten im Vergleich zu monolithischen eine weitaus höhere Funktionsvielfalt. Nach DIN 23564 (2004A) handelt es sich dabei um Systeme, bei

2 Stand der Technik in der Mikromontage

denen „die Integration von Mikrokomponenten und Funktionseinheiten mittels spezieller Mikromontage-, Mikrojustage-, Aufbau- und Verbindungstechniken erfolgt“. Die Kombination verschiedener, teils heterogener Mikrosysteme und -komponenten zu einem Gesamtsystem ermöglicht die Umsetzung komplexer optischer oder fluidischer Funktionen (HILLERINGMANN 2006). Auch die Verwendung verschiedener Materialien und die Möglichkeit, Systeme dreidimensional aufbauen zu können, eröffnen neue Alternativen für die Funktionsintegration (SCHELLER 2001). Bild 2-3 zeigt als Beispiel einen Mikrolaser des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF). Auf einer Zentralplatine aus Kunststoff sind die Steuer Elektronik, ein Leistungskondensator, eine monochromatische Laserdiode, eine Fokussieroptik sowie die Kühlelemente untergebracht. Alle Komponenten sind aus unterschiedlichen Werkstoffen mit verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellt und mit Spezialklebstoffen oder -loten miteinander verbunden. Mikrosysteme dieser Komplexität lassen sich technisch bis heute ausschließlich durch eine hybride Bauweise umsetzen.

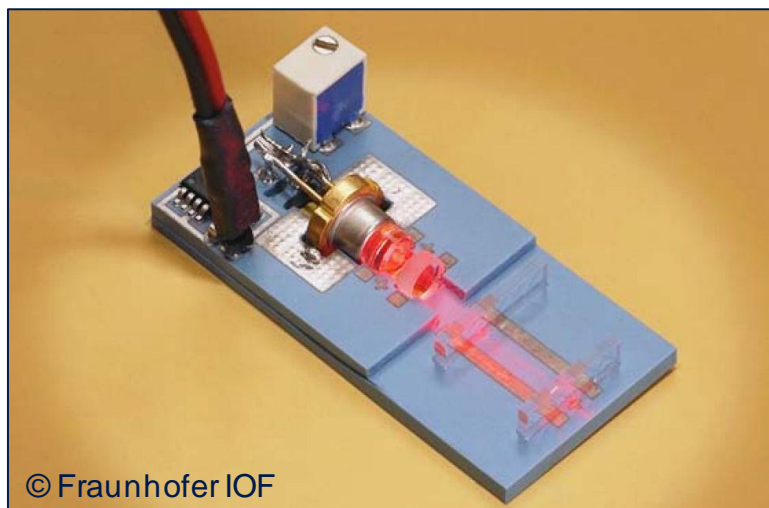


Bild 2-3: Mikrolaser (zur Verfügung gestellt vom Fraunhofer IOF)

Nachteile der hybriden Technologie sind im Vergleich zu monolithischen Systemen ein größeres minimal erreichbares Volumen, eine geringfügig niedrigere Integrationsdichte sowie die durch die Mikromontage verursachten höheren Herstellkosten (HSU 2004). Herkömmliche Mikromontagesysteme sind, um die erforderlichen Positioniergenauigkeiten zu erreichen, mit aufwendiger Technik ausgestattet, wie z.B. Luftlagern, Direktantrieben oder Granitbetten. Aufgrund der kostenintensiven Anlagentechnik entfallen nach CHOLLET UND JACOT (1999) mehr als 80 % der gesamten Herstellkosten hybrider Mikrosysteme auf deren Montage. Mikrosysteme in kleinen und mittleren Stückzahlen werden deshalb bis heute oft manuell montiert. Infolge der zunehmenden Verkleinerung und steigenden Komplexität der Systeme lassen sich manuelle Verfahren aber immer schlechter umsetzen.

2.1.4 Mikro- und Präzisionsmontage

Mikrosystemtechnische Komponenten lassen sich grob in drei unterschiedliche Größenordnungen einteilen, und zwar in den Zenti-, den Milli- und den Mikrobe- reich (SCHWEIZER ET AL. 1993). PETERSEN (2003) charakterisiert unterschiedliche Montagetypen durch die Indikatoren „Montagegenauigkeit“ und „Bauteilabmessun- gen“ (Bild 2-4). Die Mikromontage zeichnet sich durch Bauteilabmessungen unter 2 mm Kantenlänge und eine geforderte Montagegenauigkeit von bis zu 25 µm aus. Interessant ist die Abgrenzung gegenüber der Präzisionsmontage, die bei deutlich größeren Bauteilabmessungen eine höhere Montagegenauigkeit erfordert (PETERSEN 2003).

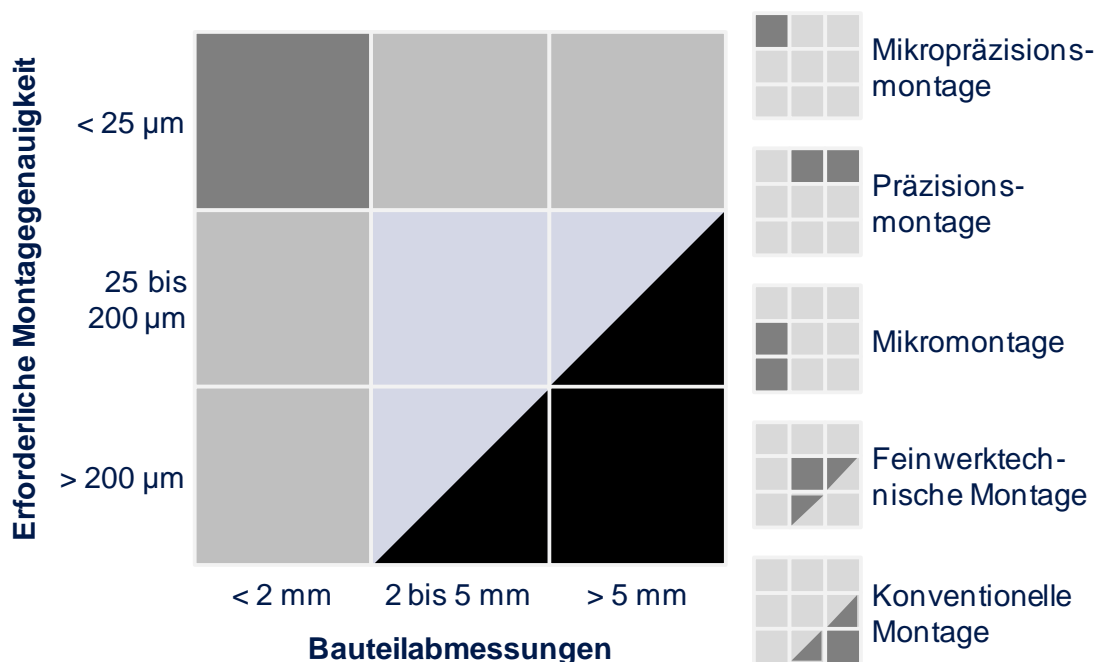


Bild 2-4: Unterschiedlicher Montagetypen in Anlehnung an PETERSEN (2003)

Bei optischen Mikrobaugruppen fällt auf, dass Mikrolinsen und Mikrospiegel flächige Bauteile sind, die Kantenlängen bis zu 10 mm aufweisen. Dennoch müssen diese Baugruppen bis auf wenige Mikrometer genau positioniert werden. Die Montage hybrider MOEMS fällt daher in die Bereiche der Präzisions- oder Mikropräzisionsmontage, sie ist nicht der klassischen Mikromontage zuzuordnen.

PETERSEN (2003) betont allerdings, dass die Übergänge zwischen den verschiedenen Montagetypen fließend sind und der Begriff „Mikromontage“ gewöhnlich auch für die Bereiche der „Präzisionsmontage“ und „Mikropräzisionsmontage“ verwendet wird. Zudem lassen sich technische Entwicklungen, die für einen Montagetyperarbeitet werden, in der Regel auf die anderen, zumindest aber auf die angrenzenden Typen übertragen.

2 Stand der Technik in der Mikromontage

Generell wird zwischen manueller und automatisierter Mikromontage unterschieden. Die manuelle Mikromontage umfasst nach SCHARVOGEL (1989) alle montage-relevanten Arbeitsvorgänge wie das Montieren, Justieren, Prüfen und Fügen „bei denen der Mensch feingesteuerte manuelle Bewegungen an Bauteilen und/oder Betriebsmitteln ausführt, die Seh- und/oder Handhabungshilfen erfordern“. Demgegenüber steht die automatisierte Mikromontage. Sie ist nach DIN 23564 (2004B) wie folgt definiert: Die automatisierte Mikromontage „*ist der Zusammenbau mikro-technischer Bauteile, Aufbau von Mikrokomponenten auf Montageflächen oder deren Einbau in Gehäuse einschließlich elektrischer Kontaktierung and Erstellung sonstiger Anschlüsse (z. B. Medien)*“. LUNZE (2008) legt weiterhin fest, dass die automatisierte Mikromontage „*durch selbsttätig gesteuerte, mechanisierte Systeme*“ durchgeführt wird. Alle Prozessschritte der Montage, also Teilezuföhren, Greifen, Positionieren und Orientieren sowie Fügen (PETERSEN 2003), erfolgen dabei ohne Eingriff des Menschen.

Sowohl bei der manuellen als auch bei der automatisierten Mikromontage sind die Bauteilpositionierung und die anschließende Fügeoperation die qualitäts- und funktionsbestimmenden Prozessschritte. Die Bauteilpositionierung erfolgt entweder manuell mit Handhabungshilfen wie beispielsweise Telepräsenzsystemen (REINHART ET AL. 2008B; EHRENSTRABER 2008) oder computergesteuert durch automatische Roboterachsen mit entsprechenden Greifvorrichtungen (SCHÖTTLER 2008; FISCHER 1997). In der Mikro- und Präzisionsmontage etablierte Fügeverfahren sind das anodische Bonden, das „Glass Sealing“, das „Silicon Direct Bonding“, das eutektische Bonden, das Löten, das Mikroschweißen, das Steckverbinden und das Kleben sowie das Vergießen (DITTRICH 2004; FISCHER 1997). Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren kann MENZ ET AL. (2005), HABENICHT (2006), SCHEEL (2006) und BÜTTGENBACH (1994) entnommen werden.

Welches Montageverfahren gewählt wird, hängt von den technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen des Montageprozesses ab. Die manuelle Mikromontage zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität aus, sie ist aber nur für geringe Stückzahlen wirtschaftlich. Die steigende Integrationsdichte der Mikrosysteme und die zunehmende Bauteilverkleinerung führen außerdem dazu, dass die manuelle Montage trotz Seh- und Handhabungshilfen immer öfter an ihre technischen Grenzen stößt (KORB 2002). Automatisierte Mikromontagesysteme dagegen können durch Hochpräzisionsachsen und spezialisierte Sensorsysteme Montageoperationen wesentlich präziser und reproduzierbar durchführen (VAHRENKAMP 2002). Allerdings ist die automatisierte Mikromontage durch hohe Investitionskosten und einen zum Teil hohen Entwicklungsaufwand gekennzeichnet. Die laufenden Kosten liegen dennoch weit unter den Lohnkosten für spezialisierte Arbeiter an manuellen

Mikromontageplätzen. FISCHER (1997), PETERSEN (2003) und HESSELBACH ET AL. (2006) zeigen, dass die Montageautomatisierung auf lange Sicht die einzig wirtschaftliche und technisch sinnvolle Alternative darstellt.

2.2 Automatisierte Mikromontagesysteme

2.2.1 Grundlegender Systemaufbau

Automatisierte Mikromontagesysteme bestehen aus sechs Hauptfunktionseinheiten: der *Steuerungstechnik*, den *Kinematik- und Positioniersystemen*, den *Endeffektoren*, den *Sensorsystemen zur Bauteillagebestimmung*, der *Zuführtechnik* sowie den prozessspezifischen *Zusatzmodulen*. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Funktionseinheiten erfolgt in der Regel über ein Bussystem oder über spezielle Kommunikationsschnittstellen. Bild 2-5 zeigt einen Überblick über die Funktionseinheiten automatisierter Mikromontagesysteme.

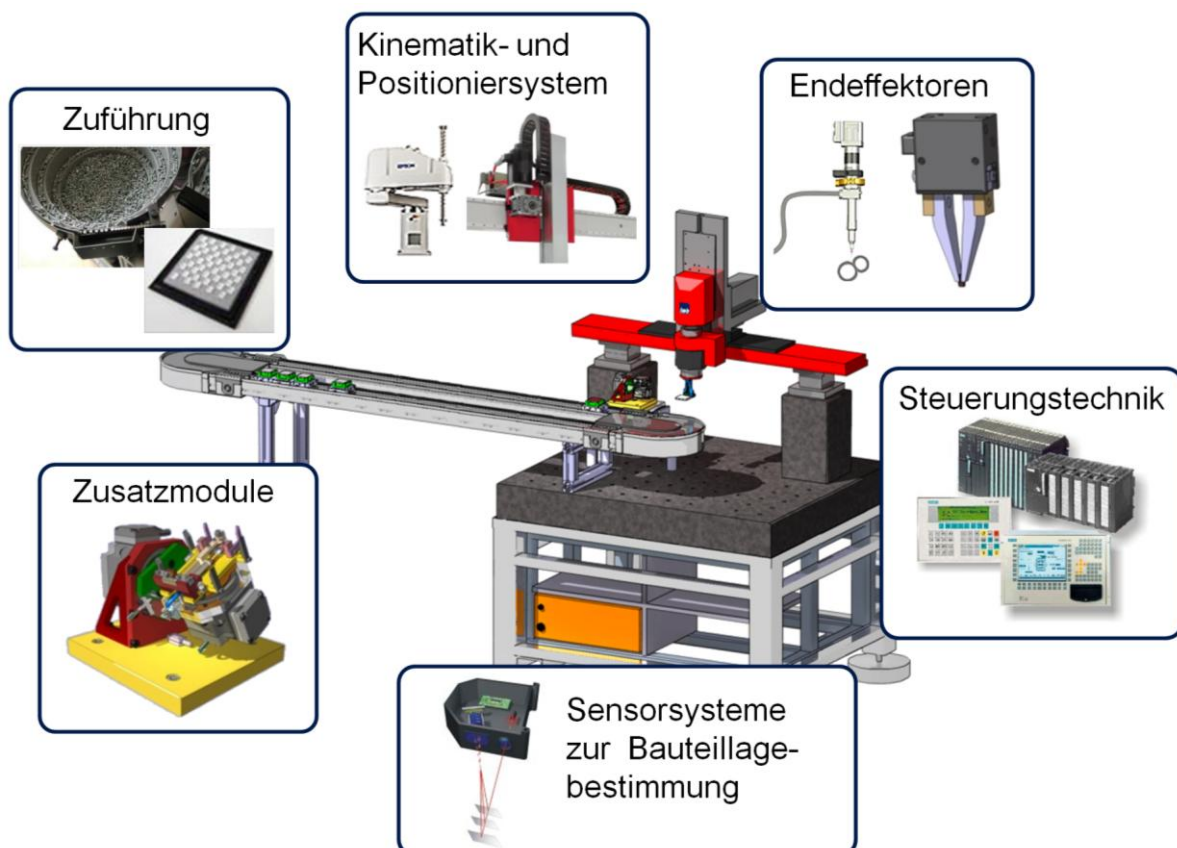


Bild 2-5: Funktionseinheiten eines automatisierten Mikromontagesystems

Kernelement und „Gehirn“ eines automatisierten Mikromontagesystems ist die Steuerungstechnik bzw. das Automatisierungscomputersystem. Es koordiniert und

2 Stand der Technik in der Mikromontage

steuert alle Aktivitäten des automatisierten Mikromontagesystems (LAUBER ET AL. 1999; O'GRADY ET AL. 1988).

Eine weitere zentrale Funktionseinheit automatisierter Mikromontagesysteme ist das *Kinematik- und Positioniersystem*. Es beeinflusst die Montagegenauigkeit und die umsetzbaren Fügeorientierungen. In der Mikromontage sind kartesische Portalkinematiken in Verbindung mit Piezoaktoren oder Lineardirektantrieben aufgrund ihrer Steifigkeit, ihrer Geschwindigkeit und ihrer Positioniergenauigkeit verbreitet. Die Wiederholgenauigkeiten solcher Systeme liegen im Bereich von 0,1 bis 0,5 μm (SYSMELEC 2009; DILTHEY 2005; WECK ET AL. 2003). Aus Kosten- und Flexibilitätsgründen kommen auch häufig SCARA-Kinematiken (**S**elective **C**ompliance **A**ssembly **R**obot **A**rm) mit unersetzten Schrittmotoren zum Einsatz. Allerdings erreichen diese Systeme derzeit lediglich Wiederholgenauigkeiten von ca. 5 μm (MITSUBISHI ELECTRIC 2010; YAMAHA 2009; EPSON 2009).

Neben Kinematik und Steuerungstechnik sind die *Endeffektoren* wesentliche Elemente von Mikromontagesystemen. Sie bilden die Schnittstelle zwischen Kinematik und Bauteil. Gängige Endeffektoren sind Greifer oder Dispenser. Je nach Größenordnung der zu montierenden Bauteile kommen unterschiedliche Aktorprinzipien in den Endeffektoren zum Einsatz. Beispiele für Greiferaktoren sind Formgedächtnislegierungen (FGL), Piezoaktoren sowie pneumatische, elektromagnetische oder elektrostatische Aktoren (FISCHER 1997).

Eine weitere wichtige funktionale Gruppe einer Mikromontageanlage sind die *Sensorsysteme zur Bauteillagebestimmung*. Sie ermöglichen die *Überwachung des Montage-raums und die Detektion der genauen Bauteillage und -orientierung*. Die Genauigkeit, mit der die Position eines Bauteils sensiert werden kann, hat einen direkten Einfluss auf Montagequalität und -präzision (HANKES 1998). In der vorliegenden Arbeit werden die Sensoren zur Bauteillagebestimmung in *Primär-* und *Sekundärsensoren* unterteilt. Erstere erfassen die Montageposition direkt am Bauteil. Beispiele für Primärsensoren sind Kameras mit Bildverarbeitungssystemen, Lasertaster oder photogrammetrische Bildsensoren (BERNDT 2007). Letztere messen nicht unmittelbar am Bauteil, lassen aber die Bestimmung dessen Position aufgrund logisch physikalischer Zusammenhänge zu. Sekundärsensoren sind beispielsweise inkrementale Messsysteme zur Erfassung von Achspositionen oder Lichttaster zur Überwachung von Greiferzuständen (MA 1999). Allgemeine Sensoren zur Zustandsüberwachung der Anlage werden nicht den Sensorsystemen zur Bauteillagebestimmung zugeordnet (LUNZE 2008; LOTTER ET AL. 2006).

Neben diesen Kernelementen verfügen viele Mikromontageanlagen über *prozessspezifische Zusatzmodule*. Diese werden auf Basis produktabhängiger Anforderungen entwickelt und sind *in ihrer Funktion nicht auf andere Prozesse und Anlagen*

übertragbar. Sie erfüllen Funktionen wie Klebstoffauftragsprozesse, Funktionsprüfungen zur Qualitätssicherung, oder Werkstückwendevorgänge.

Die letzte Funktionseinheit, die in automatisierten Mikromontagesystemen integriert ist, ist die *Zuführtechnik*. Ihre Aufgabe ist die Bereitstellung aller zu montierenden Komponenten. Mikrosystemtechnische Bauteile werden bei ihrer Fertigung in Blistergurten, Gel- oder Wafflepacks vororientiert magaziniert (GRIMME ET AL. 1998). Für empfindliche optische Mikrokomponenten werden bauteilangepasste Formnester verwendet (SCHMUTZ 1996). Förderbänder mit Werkstückträgerspannsystemen oder Halter für den manuellen Magazinwechsel stellen die Bauteile dann in diesem Zustand bereit. In seltenen Fällen werden Mikrokomponenten auch im Haufwerk transportiert und gelagert. Zu deren Vereinzelung kommen spezielle, bauteilschonende Vibrationswendelförderer zum Einsatz (LOY 2010).

Moderne, kommerziell verfügbare Mikromontagesysteme folgen dem industriellen Trend zur Wandlungsfähigkeit und sind flexibel, modular und rekonfigurierbar aufgebaut (BENGEL 2005).

2.2.2 Unterschiede zu Makromontagesystemen

O'GRADY ET AL. (1988) beschreiben automatisierte Fertigungssysteme als computergesteuerte Anordnungen „*von halb-unabhängigen Arbeitsstationen und einem Materialhandhabungssystem- mit der Aufgabe, mehrere verschiedene Teile [...] effizient herzustellen*“ (O'GRADY ET AL. 1988). Diese Definition gilt für alle automatisierten Montagesysteme sowohl im Mikro- als auch im Makrobereich. Betrachtet man jedoch die umzusetzenden Montageprozesse und die daraus resultierenden technischen Anforderungen, ist festzustellen, dass sich einige Funktionseinheiten der Mikromontagesysteme gravierend von jenen der Makromontagesysteme unterscheiden. Für beide Systemtypen gilt: Je näher eine Funktionseinheit am Bauteil oder am Montageprozess ist, desto spezifischer ist sie für den Einsatzbereich. Endeffektoren und Sensorsysteme der beiden Montagesystemtypen unterscheiden sich sehr stark, wohingegen die Steuerungstechnik der Anlagen nahezu identisch ist. Kinematiken und Zuführsysteme sind zwar für den jeweiligen Einsatz optimiert, nutzen aber zu einem Großteil ähnliche Technologien.

Technische Neuerungen, die für prozessnahe Funktionseinheiten von Makromontagesystemen entwickelt werden, lassen sich nur schlecht oder gar nicht auf Mikromontagesysteme übertragen. Dies liegt vor allem an den stark unterschiedlichen physikalischen Randbedingungen und Skaleneffekten. Ein Beispiel ist die zunehmende Bedeutung von Oberflächeneffekten gegenüber Volumeneffekten (GERLACH ET AL. 2006). Ab einer Bauteilgröße von wenigen Kubikmillimetern dominieren

2 Stand der Technik in der Mikromontage

Oberflächenkräfte – wie Elektrostatik, Adhäsion, Van-der-Waals-Kräfte und Oberflächenspannungen – über die Volumenkräfte – wie die Gewichtskraft oder die Trägheit (MABOUDIAN ET AL. 1997). Mikrogreifer sind daher grundlegend anders als Makrogreifer aufgebaut und nutzen unterschiedliche Aktorwirkprinzipien.

Sensorsysteme, die für die Mikromontage konzipiert sind, müssen wesentlich höhere Genauigkeiten erzielen als diejenigen, die für die Makromontage entwickelt werden. Nur wenige physikalische Wirkprinzipien sind zur Messung geeignet, wie zum Beispiel elektromagnetische Wirbelströme, Elektronenstreuung, berührende Abtastung über Cantilever oder Lichtwellen (DRIESSEN 2008; DUSSLER 2003). Das liegt daran, dass die Auflösung der physikalischen Messgröße, beispielsweise die Wellenlänge des eingesetzten Lichts, höher sein muss als die geforderte Genauigkeit des Sensorsystems.

Aufgrund ihres für die Mikromontage spezifischen Aufbaus und ihrer Bedeutung für automatisierte Mikromontagesysteme wird in den folgenden Abschnitten ein Überblick über *Positioniersysteme* und *Endeffektoren* gegeben. *Sensorsysteme zur Bauteillagererkennung* werden ausführlich diskutiert, da sie für den Fokus der vorliegenden Arbeit – die Entwicklung eines laserreflexionsbasierten Sensorsystems zur Bauteillagererkennung – besonders wichtig sind.

2.2.3 Positioniersysteme

2.2.3.1 Kinematiken

In der Mikromontage kommen serielle und parallele Kinematiken zum Einsatz (DITTRICH 2004). Bild 2-6 zeigt Beispiele für beide Kinematiktypen, zwei Systeme auf Basis des SCARA-Prinzips (Selective Compliance Assembly Robot Arm), ein kartesisches System und einen Multipod.

Serielle Systeme bilden offene kinematische Ketten und haben Vorteile hinsichtlich Arbeitsraum und Baugröße. Parallel strukturierte Systeme erreichen dagegen durch geschlossene kinematische Ketten höhere Positioniergenauigkeiten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich in seriellen Systemen die Ungenauigkeiten der einzelnen Gelenke und Achsen zu einer Gesamtabweichung addieren. In Parallelkinematiken können Positionsabweichungen durch die redundante Endeffektorabstützung kompensiert werden (HESSELBACH ET AL. 2002A). Außerdem zeichnen sich parallele Systeme durch geringere bewegte Massen pro Gelenk und eine höhere Steifigkeit aus. Dadurch erreichen sie im Vergleich zu seriellen Kinematiken eine höhere Dynamik (THOBEN 1999).

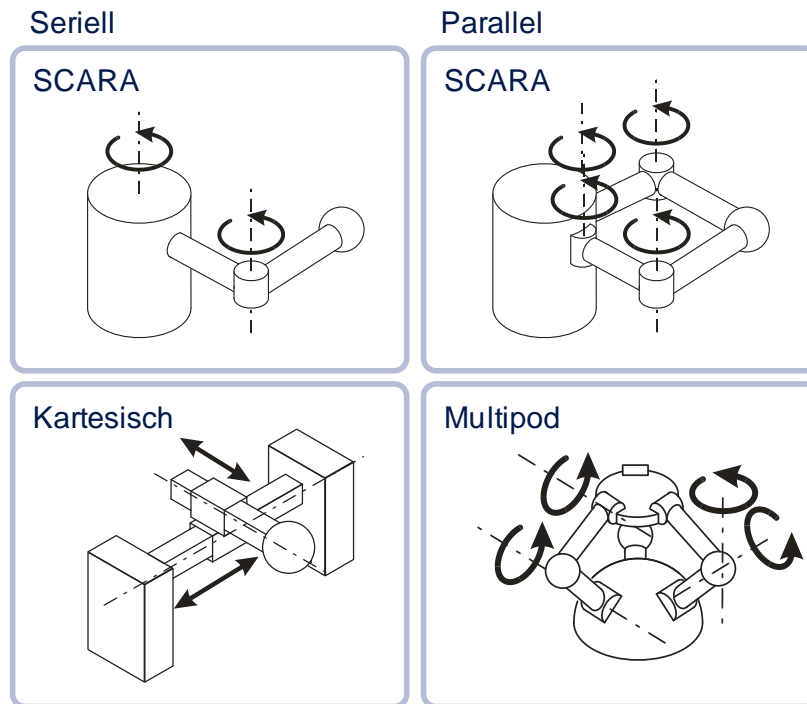


Bild 2-6: Serielle und parallele Kinematiken für die Mikro- und Präzisionsmontage

2.2.3.2 Antriebe und Aktorik

Eine hochgenaue Positionierung eines Bauteils ist ohne passende Antriebe nicht realisierbar. Unabhängig vom Typus der Kinematik werden an die Antriebe von Präzisionsrobotern hohe Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit, Drehzahlstellbereich, Steifigkeit, Masse und Volumen gestellt. Dabei kommen hauptsächlich zwei physikalische Wirkprinzipien zum Tragen: *Elektromagnetismus* und der *piezoelektrische Effekt*.

In viele Handhabungsmaschinen werden nach HESSE (1993) Elektromotoren eingebaut, die zur Drehzahlreduzierung an ein Getriebe gekoppelt sind. Sie arbeiten sauber und sind daher für den Einsatz in Reinräumen geeignet. Zudem benötigen sie vergleichsweise wenig Energie und zeichnen sich durch gute Steuer- und Regelbarkeit aus. Unterschieden wird zwischen *Direktantrieben* (KLEMENT 2009) und *hochübersetzten Antrieben* (DILTHEY 2005). Direktantriebe verwenden Aktoren, die ihre Kraft direkt, ohne Über- oder Untersetzung, auf die anzutreibende Systemkomponente übertragen. Die erhöhte Systemsteifigkeit von Direktantrieben und ihre geringen bewegten Massen ermöglichen den Einsatz hoch dynamischer Regelungen für sehr genaue Positionieraufgaben, hohe Beschleunigungen und dadurch verkürzte Taktzeiten (GIBLER 2005). Da das Getriebe als Übertragungselement zwischen Antriebs- und Abtriebsseite bei Direktantrieben entfällt, reduziert sich außerdem die Verlustleistung. Dies beeinflusst den Wirkungsgrad des Antriebs positiv (KLEMENT

2 Stand der Technik in der Mikromontage

2009). Allerdings steigen laut CLAUBNITZER (2004) die Anforderungen an die Regelungsgüte aufgrund der hohen Dynamik der Direktantriebe. Weitere Grenzen setzen die erreichbare Stromdichte und der verfügbare Einbauraum, da beide Faktoren überproportional mit den erzeugten Drehmomenten bzw. Schubkräften ansteigen.

Dort wo der verfügbare Einbauraum den Einsatz eines Direktantriebes nicht zulässt oder die Genauigkeit eines Direktantriebs nicht ausreicht, werden hoch übersetzte Antriebe eingesetzt. Eine Getriebestufe zwischen Motor und Abtrieb reduziert die Drehzahl und erhöht damit die erreichbare Genauigkeit des Antriebs und dessen Drehmoment. In der Mikro- und Präzisionsmontage müssen Getriebe höchste Übersetzungen in einer Stufe bei geringem Bauraum realisieren, hohe Torsionssteifigkeit und geringes Spiel besitzen sowie eine lange Lebensdauer mit gutem Wirkungsgrad aufweisen. Insbesondere die Spielfreiheit der Getriebe muss den Anforderungen in der Mikromontage genügen. Geeignet sind vorgespannte Planetengetriebe (KIM ET AL. 2009), Schneckengetriebe (KRAUSE 2004) und Reduktionsgetriebe, wie Zykloidgetriebe (RUFFNER 2001) oder Harmonic-Drive-Getriebe (DEGEN ET AL. 2004; SLATTER ET AL. 2004). Als Motoren bieten sich besonders Schrittantriebe an, da diese hochgenau minimale Wege verfahren können und so bereits antriebsseitig eine hohe Wegauflösung gewährleisten (ZESCH 1997).

Neben elektromagnetischen Aktoren sind besonders *piezoelektrische Antriebe* für die Mikromontage prädestiniert. Sie nutzen die elektrostriktiven Eigenschaften von Piezokristallen und vereinen Positioniergenauigkeiten im Nanometerbereich mit Ansteuerfrequenzen von mehreren kHz und hohen Kräften (ARNAU ET AL. 2008). Der Nachteil von Piezoantrieben ist ihr extrem geringer Hub von lediglich ca. 0,2 % ihrer Eigenlänge (MULLING ET AL. 2001). Viele Antriebskonzepte basieren deshalb auf einer harmonischen Anregung des Aktorkristalls (DEVOS ET AL. 2004). Ein Beispiel dafür ist der Nibbel-Antrieb (Bild 2-7). Der Nibbel-Antrieb macht sich eine Kombination von Längenkontraktion und Wellenbewegung des Aktorkristalls zunutze. Der Piezoaktor des Antriebs schiebt während einer Halbschwingung eine lineare oder rotatorische Achse über einen Reibschlusskontakt an (Bild 2-7, 1 bis 3). In der folgenden Halbschwingung bewegt er sich ohne Kontakt auf seine Ursprungsposition zurück (Bild 2-7, 4 bis 5). Die erreichbaren Drehmomente bzw. Schubkräfte sind jedoch durch die übertragbare Reibungskraft zwischen Piezofinger und Schubleiste beschränkt.

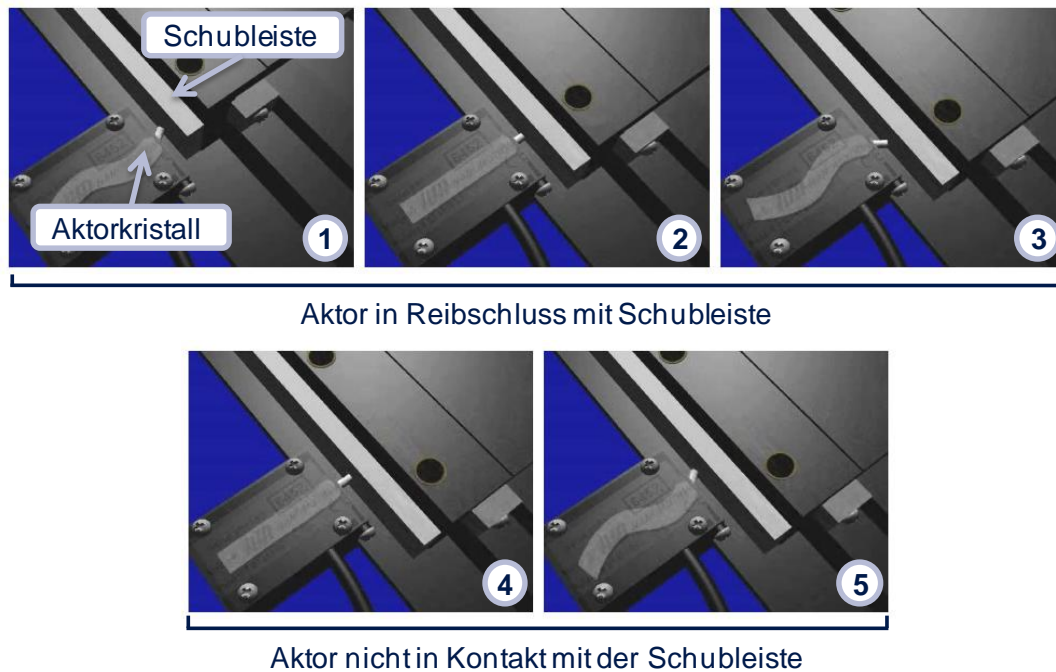


Bild 2-7: Funktionsweise eines Piezo-Nibbel-Antriebs am Beispiel des Nanomotion Drive (JOHNSON ELECTRIC - NANOMOTION 2009)

Weitere Piezoresonanzmotoren, die zur Kraftübertragung zwischen Aktor und Abtrieb auf Reibschluss zurückgreifen, sind Piezoelipsoidantriebe (DEVOS ET AL. 2003), Piezostepper (PHYSIK INSTRUMENTE (PI) 2010) und Elliptec-Antriebe (ELLIPTEC RESONATOR ACTUATORS 2009). Ein anderes Prinzip zur Kraftübertragung verfolgt der Piezorotationsantrieb. Er verfügt über eine formschlüssige Verbindung zwischen Aktor und Abtrieb. Eine steif gelagerte Welle mit einer Mikroaußenverzahnung greift in eine Mikroinnenverzahnung eines Rings aus gehärtetem Stahl. Dieser Ring wird durch vier Piezoaktoren auf einer kreisförmigen Bahn bewegt, wodurch die Welle um einen Zahn pro Umdrehung rotiert. (HOFERICHTER 2006; RUCHA 2010). Bedingt durch seine Bauweise kann dieser Antrieb wesentlich höhere Drehmomente erzeugen als Systeme mit reibschlussgekoppeltem Abtrieb.

2.2.3.3 Präzisionsroboter

Die derzeit genauesten, kommerziell erhältlichen Positionierer sind serielle, kartesische Portalroboter. Konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Steifigkeit, die Verwendung von Direktantrieben und die Integration hochgenauer Messsysteme ermöglichen deren Einsatz im Bereich der Mikromontage (HESSELBACH ET AL. 2002B). Beispiele für solche Systeme sind der Montageautomat Autoplace 411 der Firma Sysmelec (Bild 2-8, a) (SYSMELEC 2009), das Hochpräzisionssystem der Firma SPI (SPI ROBOT SYSTEME 2009) oder die MicRohCell® der Rohwedder AG

2 Stand der Technik in der Mikromontage

(ROHWEDDER 2008). Die genannten Montagesysteme erreichen Positioniergenauigkeiten von 100 bis 1000 nm.

Neben kartesischen Robotern werden im industriellen Umfeld vor allem SCARA-Kinematiken eingesetzt. Zwar erreichen diese nicht die gleichen Genauigkeiten und Geschwindigkeiten, sie sind aber wesentlich kostengünstiger. Ein weiterer Vorteil ist die geringere Baugröße. Die Positioniergenauigkeiten von hochpräzisen SCARA-Systemen liegen derzeit bei ca. 5 μm . Bild 2-8 (b) zeigt ein Funktionsmuster des parallelen, größenangepassten SCARA-Präzisionsroboters „Parvus“, der am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig entwickelt wurde (STUMPP ET AL. 2006).

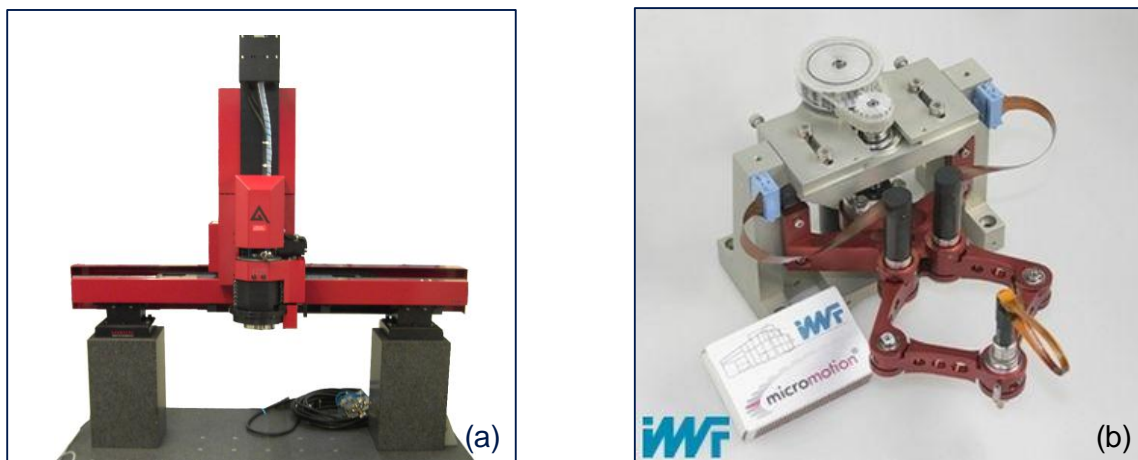


Bild 2-8: Beispiele für kommerziell erhältliche Präzisionsroboter: (a) Sysmelec Autoplace 411 (SYSMELEC 2009); (b) Funktionsmuster Parvus (STUMPP ET AL. 2006)

Die letzte Gruppe von Kinematiken, die in der Mikromontage herangezogen werden, sind die Multipoden. Bei ihrem Aufbau wird eine Plattform von mehreren Beinen, in der Regel von drei (Tripod) oder sechs (Hexapod), gestützt und bewegt. Multipoden erreichen Genauigkeiten von bis zu 30 nm. Aufgrund der komplexen Regelungstechnik und des sehr eingeschränkten Arbeitsraums werden Multipoden nur im Laborumfeld oder für spezielle Optikanwendungen eingesetzt (HESSELBACH ET AL. 2002B). Eine Ausnahme bildet das System Triglade, das im Sonderforschungsbereich SFB 562 „Robotersysteme für Handhabung und Montage“ entwickelt wurde (Bild 2-9, a). Dieser Tripod ist für einen industriellen Einsatz geeignet und erreicht eine Positioniergenauigkeit von 2,5 μm (BUDDE ET AL. 2007). Kommerziell werden Multipoden beispielsweise von den Firmen „Physik Instrumente“ (PI) (Bild 2-9, b) oder Hephaist Seiko angeboten.

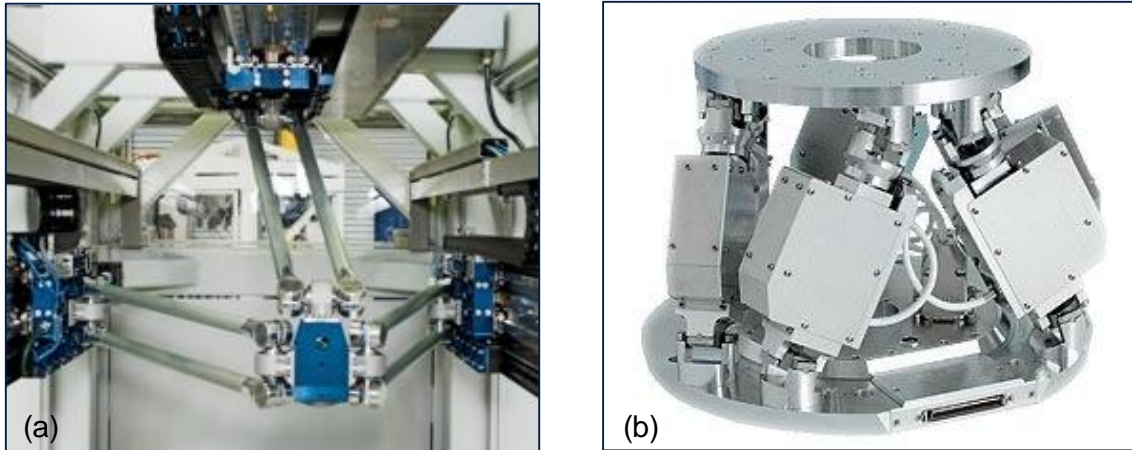


Bild 2-9: Beispiele für Multipod-Präzisionsroboter: (a) Triglide-Roboter (BUDDE ET AL. 2007); (b) PI M-824 (PHYSIK INSTRUMENTE (PI) 2008)

Weitere Forschungsansätze zur hochgenauen Handhabung von Bauteilen sind die Arbeitsraumoptimierung von Hochpräzisionstripoden durch den Einsatz von variablen Gliederlängen (KERLE ET AL. 2001), die Kombination von herkömmlichen Industrierobotern mit hochgenauen Positioniersystemen am Endeffektor (HÖHN 2001; BRECHER ET AL. 2006) und die Handhabung von Mikrokomponenten durch frei bewegliche, teilweise autonome Mikroroboter (FATIKOW 2000; WÖRN ET AL. 2001; MARTEL 2001). Der Reifegrad dieser Systeme ist allerdings noch gering.

2.2.4 Endeffektoren

2.2.4.1 Einordnung in das Mikromontagesystem

Endeffektoren automatisierter Mikromontagesysteme bilden die Schnittstelle zwischen deren makroskopischen Positionierkinematiken und den zu montierenden Mikrobauteilen. Sie stellen die Komponente automatisierter Montageanlagen dar, die direkt mit dem Bauteil in Berührung kommt oder zumindest mit ihm interagiert. Endeffektoren kommen deshalb mit allen in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen, mikro-spezifischen Effekten in Berührung. Der Übergang zwischen Makro- und Mikrowelt erfolgt entweder an der Kontaktfläche zwischen Endeffektor und Bauteil oder – wie beispielsweise bei Mikrogreifern – innerhalb des Endeffektors an der Koppelstelle zwischen Greifer und Roboterflansch (FISCHER 1997).

In der automatisierten Mikromontage kommen zwei unterschiedliche Typen von Endeffektoren zum Einsatz, *Greifer* und *Prozess-Endeffektoren*. Erstere dienen der Handhabung von Bauteilen und ermöglichen die Manipulation deren Position und Orientierung. Greifer kommen in fast allen Montageanlagen zum Einsatz und sind Voraussetzung für die Automatisierung von Fügeprozessen (SEEGRÄBER 1993).

2 Stand der Technik in der Mikromontage

Prozessspezifische Endeffektoren decken dagegen alle Montage-unterstützenden Funktionen ab. Beispiele sind die Zuführung von Hilfsstoffen oder die Positionierung von Sensoren. Sie sind nicht zwangsläufig Bestandteil einer Mikromontageanlage. Erfordert ein Montageprozess viele verschiedene Endeffektoren, werden diese in der Regel durch automatisierte Wechsellösungen aufgabenspezifisch getauscht.

2.2.4.2 Greifer

In Anlehnung an FISCHER (1997) und die VDI-Richtlinie 2860 (VDI 1990) können Greifer definiert werden als Endeffektoren, die in der Lage sind, *eine begrenzte Anzahl von geometrisch bestimmten Werkstücken für einen bestimmten Zeitraum zu halten*. Dabei lassen sich Greifer nach sechs unterschiedlichen physikalischen Wirkprinzipien gliedern: mechanische Greifer, Vakuum- oder Unterdruckgreifer, elektrostatische Greifer, Adhäsionsgreifer, Magnetgreifer und Ultraschallgreifer (HESSELBACH ET AL. 2002B; SCHILP 2007). Des Weiteren kann die Gruppe der mechanischen Greifer in Finger-, Zangen- und Klemmgreifer unterteilt werden. Vakuumgreifer, elektrostatische Greifer sowie Adhäsions- und Magnetgreifer werden dagegen der übergeordneten Kategorie der Haftgreifer zugerechnet (HESSE 1991). Ultraschallgreifer ordnen sich in die Gruppe der berührungslosen Greifsysteme ein.

In der Mikromontage werden mit Ausnahme von Magnetsystemen und gewichtsbelasteten Klemmgreifern alle Greifprinzipien eingesetzt. Die in Magnetsystemen zum Greifen erzeugten Magnetfelder könnten die zu montierenden MEMS oder MOEMS beschädigen. Gewichtsbelastete Greifsysteme funktionieren prinzipbedingt wegen der Masseverhältnisse zwischen Mikrobauanteilen und Greifer nicht. Bild 2-10 gibt einen Überblick über Greifprinzipien in der Mikromontage.

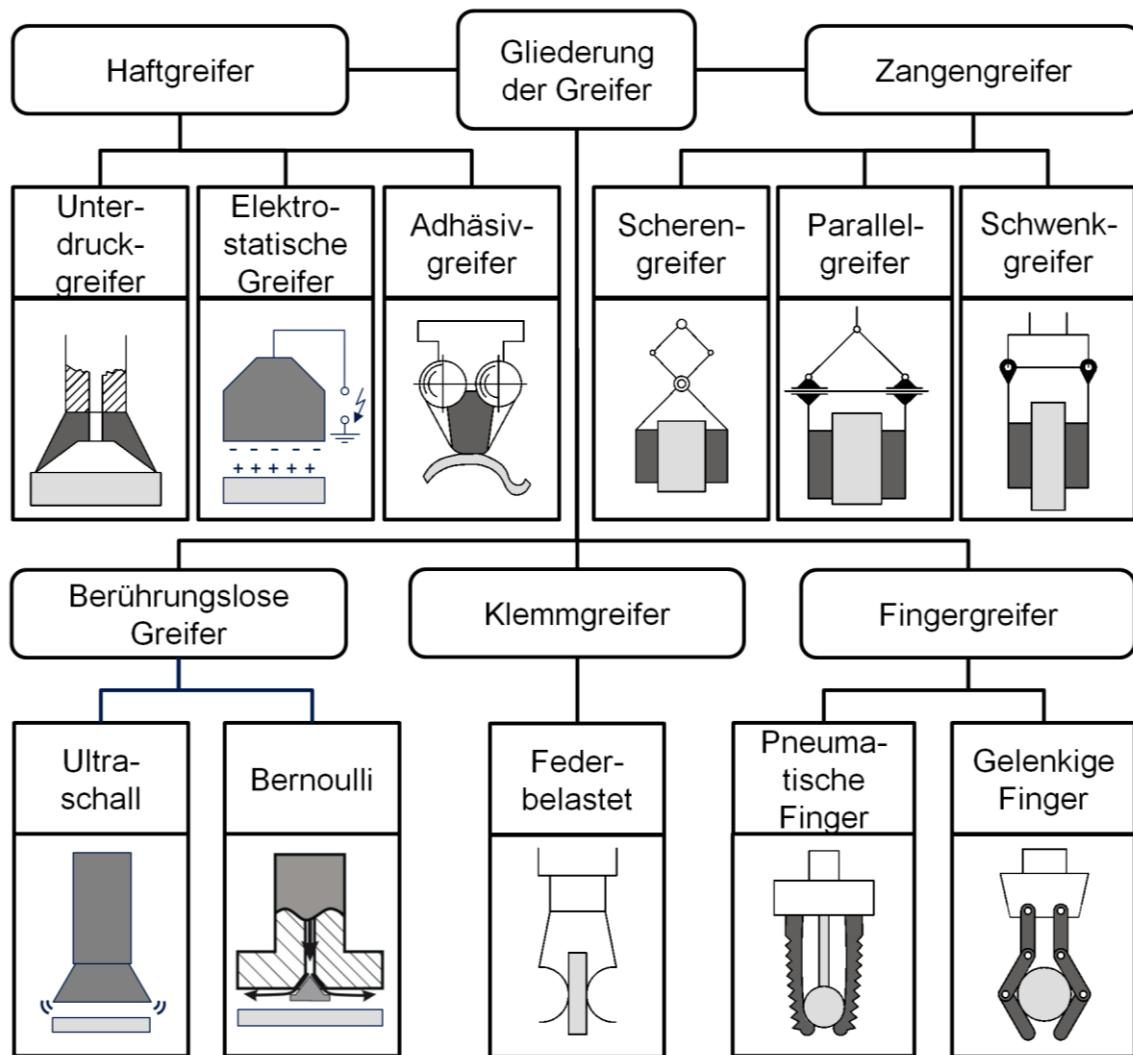


Bild 2-10: Greifprinzipien in der Mikromontage (in Anlehnung an HESSE 1991, HESSELBACH ET AL. 2007, TICHEM ET AL. 2004 und SCHILP 2007)

Als Aktoren kommen bei Mikrogreifern sowohl *neue Aktoren* als auch *konventionelle Aktoren* zum Einsatz. Unter neuen Aktoren versteht man Aktoren, die auf Formgedächtnislegierungen (FGL), Piezoaktoren, Thermobimetallen, magnetostruktiven Materialien, elektrostatischen Prinzipien oder Polymergelen aufgebaut sind (JENDRITZA 2010). Als konventionelle Aktoren werden alle in der Makrotechnik etablierten Antriebsprinzipien bezeichnet, also magnetische, hydraulische, pneumatische und elektromotorische Aktoren (JANOCHA 1993; SEEGRÄBER 1993). Vorteile konventioneller Aktoren sind die technische Reife der Technologien, ihre Robustheit und die großen erzeugbaren Stellwege. Die erreichbaren Genauigkeiten und Stellwegauflösungen liegen allerdings deutlich unter jenen der neuen Aktoren. Auch bauen neue Aktoren erheblich kleiner und ermöglichen so die Entwicklung größenangepasster Handhabungswerkzeuge (JENDRITZA 2010). Neue Aktoren sind für den Einsatz in der Mikro- und Präzisionsmontage besonders geeignet. Deren Eigenschaften, wie hohe Wegauflösung und geringer Bauraum, sind hier besonders

2 Stand der Technik in der Mikromontage

wichtig. Ihre geringen Stellwege und niedrigen abstützbaren Kräfte stellen in der Mikromontage keine signifikanten Nachteile dar.

Wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der Mikrogreiftechnik konzentrieren sich hauptsächlich auf die Erforschung neuer Antriebsprinzipien und auf die Nutzbarmachung der neuen Aktoren. Die Arbeiten von MALUKHIN & EHMANN (2008), BÜTTGENBACH ET AL. (2006), HOXHOLD ET AL. (2005), KOHL ET AL. (2002) und PITTSHELLIS (1998) befassen sich mit der Entwicklung mechanischer Mikrogreifer aus Kunststoff, die durch Formgedächtnislegierungen (FGL) angetrieben werden (Bild 2-11, a). BEYELER ET AL. (2007) beschreiben in ihrer Arbeit mechanische Greifer, die mithilfe einer Mikrokammstruktur elektrostatisch geschlossen werden können. GÖTZE ET AL. (2007), NAH ET AL. (2007), VOYLES ET AL. (2005), CARROZZA ET AL. (2000), KIM ET AL. (2004) und VOYLES ET AL. (2005) untersuchen piezogetriebene mechanische Mikrogreifer.

Auf dem Gebiet der Adhäsionsmikrogreifer arbeiten WANG ET AL. (2009), GRUTZECK ET AL. (2000), WALLE ET AL. (2007), SELIGER ET AL. (2000) und KOCHAN (1997). WANG ET AL. (2009) untersuchen den Zusammenhang zwischen der Greiferspitzengeometrie und der Menge und Tropfengröße eines aufgenommenen Adhäsivs. GRUTZECK ET AL. (2000) entwickeln Haftgreifer auf Basis von Kapillarkräften, WALLE ET AL. (2007), SELIGER ET AL. (2000) und KOCHAN (1997) befassen sich mit dem Aufbau von Kryogengreifern. Weitere Arbeiten im Bereich der Adhäsionsgreifer gehen auf WREGE (2007), HESSELBACH ET AL. (2007), OH (1998) und ENIKOV ET AL. (2003) zurück. Alle beschäftigen sich mit elektrostatischen Wirkprinzipien.

Für die Handhabung empfindlicher optischer Mikrokomponenten oder Mikrochips ohne schützende Kunststoffeinhausung bzw. der „Bare Dies“ bieten sich insbesondere berührungslose Mikrogreifer an. Technologisch sehr weit entwickelt und hervorragend für die Mikromontage geeignet ist die Handhabung mittels Ultraschalllevitation (VANDAELE ET AL. 2005). Dabei wird eine der Bauteilgeometrie angepasste Sonotrode mittels eines Piezoelements zur Ultraschallschwingung angeregt. Bedingt durch die adiabate Zustandsänderung der Umgebungsluft führt dies zu einem lokalen Überdruck unmittelbar an der Sonotrodenspitze (MINIKES ET AL. 2004; HÖPPNER 2002). Bringt man in die Sonotrode Unterdruckkanäle ein, kann auf ein unterhalb der Sonotrode liegendes Bauteil zusätzlich eine anziehende Kraft erzeugt werden (SCHILP 2007). HEINZ (2012) zeigt außerdem, dass die durch den Unterdruck erzeugte Umströmung der Bauteilkante eine zentrierende Kraft erzeugt. Bild 2-11 (b) zeigt einen Ultraschallgreifer mit schwebendem Bauteil im Kräftegleichgewicht.

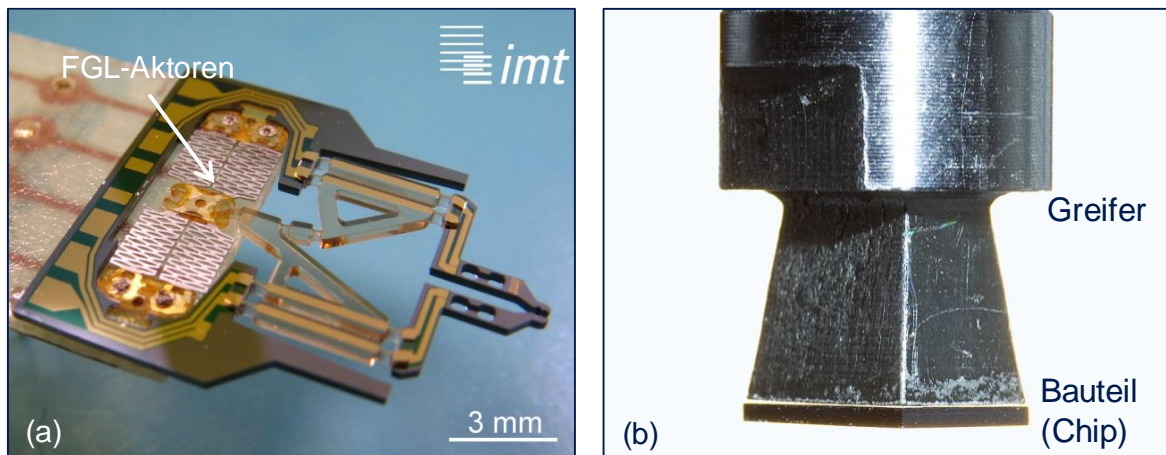


Bild 2-11: Beispiele für Mikrogreifer: (a) Mechanischer Greifer mit Aktoren aus Formgedächtnislegierungen (HOXHOLD ET AL. 2008); (b) Berührungsloser Ultraschallgreifer (REINHART ET AL. 2008B)

Ein weiterer Ansatz für die Umsetzung berührungsloser Mikrogreifer ist das hydrodynamische Paradoxon, auch Bernoulli-Effekt genannt (GOODWIN ET AL. 1992). GRUTZECK ET AL. (2002) zeigen in ihren Arbeiten die Skalierbarkeit des Bernoulli-Effekts für kleine Bauteile und beweisen theoretisch die Umsetzbarkeit berührungsloser Bernoulli-Mikrogreifer. Jedoch existieren bis dato keine funktionierenden Prototypen, die für die Handhabung mikrosystemtechnischer Komponenten geeignet wären. Die Bedeutung des Bernoulli-Effekts für die Mikrogreiftechnik kann daher als gering angesehen werden (HEINZ 2011).

Mit pneumatischen Antrieben für mechanische Mikrogreifer, also konventionellen Aktoren, setzen sich HOXHOLD ET AL. (2007) und BÜTEFISCH (2003) auseinander. Ebenfalls mit konventionellen Aktoren beschäftigt sich ZÖPPIG (1998). Er stellt erstens einen Pinzettengreifer für die Montage von Lichtwellenleitern vor, der von einem Tauschspulenaktor angetrieben wird, und zweitens einen Unterdruckgreifer mit transparenten Saugstrukturen, die den Einsatz von Durchlichtkameras erlauben. PETROVIC ET AL. (2002) befassen sich mit elektromotorisch angetriebenen Mikrogreifern. Sie beschreiben einen mechanischen Mikrogreifer, der durch einen keilübersetzten Schrittmotor in Kombination mit einer Rückstellfedermechanik geöffnet und geschlossen werden kann.

Im industriellen Umfeld werden in der Regel kommerziell verfügbare Unterdruckgreifer oder mechanische Greifer eingesetzt. Letztere werden meist durch pneumatische, elektromotorische oder piezoelektrische Aktoren angetrieben (HESSELBACH ET AL. 2002B).

2.2.4.3 Prozess-Endeffektoren

Mikrosystemkomponenten werden hauptsächlich mittels verschiedener Bondtechniken, Lötverfahren, Steckverbindungen und Klebprozesse gefügt (MENZ ET AL. 2005). Mit Ausnahme der Steckverbindungen können diese Fügeverfahren nicht ausschließlich durch den Einsatz von Mikrogreifern automatisiert werden. Deshalb werden abhängig von den eingesetzten Fügeverfahren neben Mikrogreifern weitere, prozessspezifische Endeffektoren in die Mikromontagesysteme integriert. Diese Endeffektoren dienen der Automatisierung von Montageschritten, die von dem im Montagesystem integrierten Präzisionsroboter durchgeführt werden aber nicht unmittelbar mit der Bauteilhandhabung und -positionierung zu tun haben. Die unterschiedlichen Endeffektoren und Mikrogreifer sind dabei gleichzeitig am Tool Center Point (TCP) des Präzisionsroboters angebracht (EBERHARDT ET AL. 1999) oder werden über automatisierte Werkzeugwechselsysteme getauscht (HOCH 2009; CLEVY ET AL. 2004; BRECHER ET AL. 2004).

Die größte Gruppe der Prozess-Endeffektoren bilden die *Mikrodispenser*. Mit ihnen können Flüssigkeiten, wie Klebstoffe oder Substratpasten auf Mikrosystemkomponenten aufgebracht werden. Je nach Viskosität des zu applizierenden Fluides werden von Dispenssystemen Tröpfchendurchmesser bis zu wenigen Mikrometern und Abgabemengen bis zu 30 Picolitern erreicht (GAUGEL ET AL. 2004; MEYER 2001). Bezüglich ihres Funktionsprinzips lassen sich ventilzeitgesteuerte Dispenser, Schneckentriebe und Jet-Systeme unterscheiden (FUGERE 2001; FENG ET AL. 2006; STREULE ET AL. 2004; LI ET AL. 2008). Kommerziell sind Mikrodispenser beispielsweise von den Firmen Physik Instrumente (PI) und Socorex erhältlich.

Weitere gängige Prozess-Endeffektoren sind *Bondköpfe*. Sie ermöglichen die Kontaktierung von Funktionsbausteinen über Drahtbondtechniken oder Tape-Automated-Bonding (TAB). Ein Überblick über die verschiedenen Bondverfahren geben MENZ ET AL. (2005) und HARMANN (2010). Gemein haben alle Bondverfahren, dass die Fügepartner nicht zum Schmelzen gebracht, sondern deren Oxidhäute durch Einleitung von Druck, Wärme oder Ultraschallenergie aufgebrochen werden. Gleichzeitig bringen die Verfahren die zu fügenden Oberflächen in so engen Kontakt, dass Van-der-Waals-Kräfte wirksam werden. Dadurch wird ohne übermäßigen Wärmeeintrag eine elektrisch leitende, dauerhafte Verbindung zwischen den Fügepartnern hergestellt (HARMAN 2010).

Neben Bondtechniken kommen in der Mikromontage auch Lötverfahren zur Herstellung elektrisch leitender Verbindungen zum Einsatz. Im Gegensatz zu Bondverbindungen können Lötstellen höheren mechanischen Beanspruchungen widerstehen. Beim Löten werden die Fügepartner durch ein aufgeschmolzenes Zusatzmaterial,

das Lot, miteinander verbunden (DIN 2003). Das Lot umschließt die Kontaktstellen teilweise oder vollständig und gewährleistet nach dem Erkalten eine elektrisch leitende und mechanisch belastbare Verbindung (MATTHES 2003). Zum automatisierten Löten werden in der Mikromontage *Mikrolötköpfe* eingesetzt. Je nach Bauweise führen sie Lotmaterial zu und verflüssigen dieses durch Wärmeeintrag oder bringen gezielt Wärme in ein Bauteil ein, um vorhandene Lotbumps aufzuschmelzen. Eine Zusammenfassung gängiger Lötverfahren in der Mikrosystemtechnik geben TAN ET AL. (2005).

Einmal erstellte Bondkontakte, Lötverbindungen oder mikroelektronische Schaltkreise können mithilfe von *Prüfköpfen zur Kontakt- und Leiterbahnkontrolle* auf ihre Festigkeit und Kontaktierung hin untersucht werden (KATTNER ET AL. 1977). Prüfköpfe dienen zwar nicht unmittelbar der Montage, sind aber eine wichtige Komponente der Qualitätssicherung. In der Regel bestehen diese Köpfe aus beweglichen Kontaktierungsspitzen, über die die Leitfähigkeiten bestimmter Strecken innerhalb von Mikrosystemen überprüft werden können (MADDIX ET AL. 2001).

2.2.5 Standardtechnologien zur Bestimmung der Bauteillage

2.2.5.1 Absolutpositionierung

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Systemtechnik ermöglicht die automatisierte Handhabung von Mikrokomponenten. Die Position der Mikrobauteile kann dabei lediglich durch die Summation der bekannten Positionen einzelner Anlagenkomponenten ermittelt werden. In der Regel werden die einzelnen Positionsinformationen in ein globales Weltkoordinatensystem transformiert und so in Relation zueinander gebracht (Bild 2-12). Wird eine Positionsabweichung festgestellt, muss diese zur Berechnung eines Korrekturvektors in die achsspezifischen Koordinatensysteme rücktransformiert werden. Die Achssteuerung des Kinematiksystems gleicht die Abweichung dann auf Basis des Korrekturvektors durch eine Bewegung der Achsen aus. Eine aktive, sensortechnische Erfassung des Bauteils erfolgt ebenso wenig wie die Herstellung einer Referenz oder einer direkten Beziehung zwischen Bauteil und Fügepartner (DITTRICH 2004).

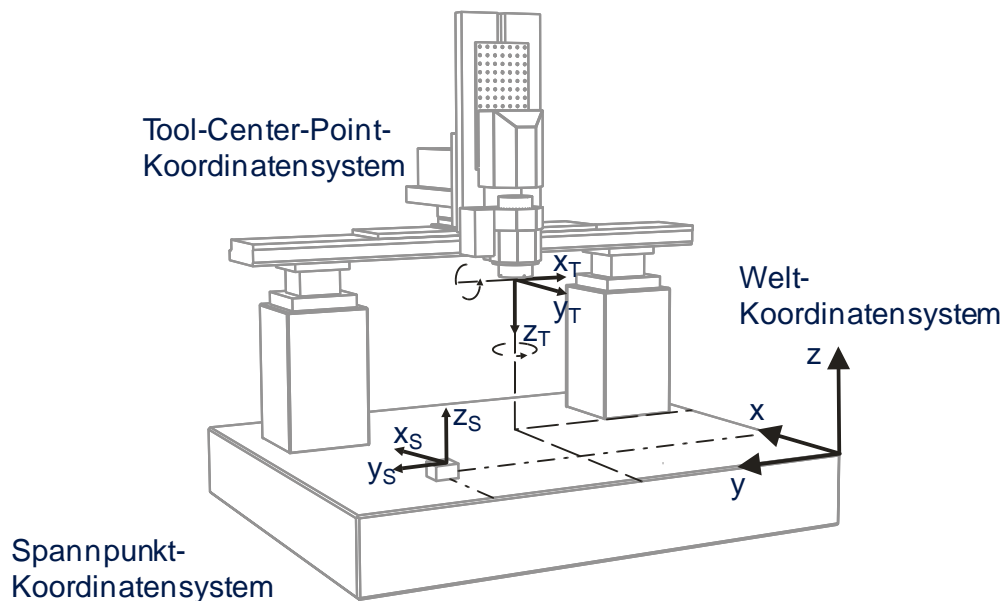


Bild 2-12: Koordinatensysteme bei Absolutpositionierung

Voraussetzung für eine hochgenaue Absolutpositionierung ist die Vermessung des Montagesystems beim Aufbau und die Kalibrierung aller beweglichen Komponenten bei der Inbetriebnahme und nach jedem Neustart. Die erreichbare Positioniergenauigkeit des Gesamtsystems hängt dabei von der Genauigkeit der Vermessungssysteme sowie der Fertigungs- und Montagegenauigkeit beim Anlagenaufbau, der Schrittweite der Achs-Encoder des Kinematiksystems, der Kalibrierungsgenauigkeit der beweglichen Komponenten, der Steifigkeit des Systems, der Temperaturstabilität der Systemkomponenten und der Genauigkeit der verbauten Greif- und Spannsysteme ab. Auch die Abschirmung des Systems gegenüber Umwelteinflüssen wie beispielsweise Vibrationen beeinflusst die Positioniergenauigkeit (HESSELBACH ET AL. 1998). Nach SCHÖTTLER (2008) und POKAR (2004) sind bei der Gewichtung einzelner Störgrößen systematische und stochastische Fehler zu unterscheiden. Erstere sind beispielsweise Fertigungs- und Montagetoleranzen, Radialschlag von Kugellagern oder temperaturbedingte Ausdehnung von Bauteilen. Systematische Fehler können, sofern deren Einflussgrößen bekannt sind, steuerungstechnisch ausgeglichen werden. Sie wirken sich daher nur geringfügig auf die Positioniergenauigkeit des Montagesystems aus. Stochastische Fehler sind z.B. das Spiel in Führungen oder ein Schwingungseintrag aus der Umgebung. Sie können im Unterschied zu den systematischen Fehlern nicht kompensiert werden, da sie nicht reproduzierbar auftreten. Sie wirken sich deshalb direkt auf die Absolutgenauigkeit des Positioniersystems aus.

HANKES (1998) identifiziert die verwendeten Kalibrierungsverfahren und deren Abweichungen als dominierende Größen für die Genauigkeit absolut positionierender Systeme. DITTRICH (2004) dagegen beschreibt die erreichbare

Absolutgenauigkeit des Handhabungssystems als maßgeblich für die Genauigkeit des Gesamtsystems. Da die Absolutgenauigkeit des Handhabungssystems stark von der Kalibrierungsabweichung und der Schrittweite der Achsregelung abhängt, sind beide Faktoren entscheidend für die Montagegenauigkeit des Gesamtsystems. Die erreichbare Genauigkeit derzeit verfügbarer, absolut positionierender Montagesysteme ist abhängig von den in Abschnitt 2.2.3.3 vorgestellten Positioniersystemen und liegt bei ca. 1-5 μm .

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei der Absolutpositionierung *die Bauteilpositionierung in einem einmaligen, absolut genauen Verfahrensschritt erfolgen muss. Kommt es bedingt durch die oben genannten Faktoren zu einer Ungenauigkeit, kann diese nicht kompensiert werden* (JACOB 2002).

2.2.5.2 Bildverarbeitende Sensoren

Unter bildverarbeitenden Sensoren versteht man in der Mikromontage die *Verbindung einer hochauflösenden Kamera mit einem geeigneten Objektiv und einem Bildverarbeitungssystem, das die aufgenommenen Bilder in Echtzeit auswertet*. Die Kamera ist dabei entweder im Endeffektor integriert und wird bei Bewegungen des Präzisionsroboters mitgeführt oder an einem Fixpunkt befestigt, der eine für die Bildverarbeitung zweckmäßige Aufnahmeperspektive gewährleistet. Zusätzlich zu Kamera, Objektiv und Bildverarbeitungssystem ist eine ausreichend helle, reflexionsfreie Beleuchtung wichtig. Aktuelle CCD-Kameras (Charge-coupled Device) oder CMOS-Kameras (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) erfassen die Bilder digital und ermöglichen eine direkte Übertragung der Daten über USB, Firewire (IEEE 1394) oder Ethernet. Bild 2-13 gibt einen Überblick über die Komponenten der Bildverarbeitenden Sensorik.

Für eine hohe Genauigkeit des Messsystems ist neben einer hinreichenden Pixelzahl des CCD-Chips der Kamera ein Objektiv notwendig, das eine möglichst geringe optische Abberation aufweist (SCHÖTTLER 2008). Kommt es linsenbedingt zu einer sphärischen Abberation, also einer Verschiebung des Fokus im Randbereich der Objektivlinsen, dann erscheint das Bild an den Rändern des Messbereichs unscharf (HECHT 2009). Des Weiteren ist eine homogene Ausleuchtung des Bildbereichs wichtig, da in der Regel Bauteilkanten oder Referenzmarken auf den Bauteilen zur Positionsbestimmung genutzt werden. Ein verzerrter Schattenwurf oder eine Abschattung von Referenzmarken kann zu Fehlern bei der Bauteilpositionierung führen. Die erreichbare Messauflösung variiert zwar abhängig von Objektiv, Kamera und Bildverarbeitungsalgorithmus, wird jedoch hauptsächlich durch die projizierte Pixelbreite der erzeugten Bilder beschränkt. Strukturen, die kleiner als ein Bildpixel

2 Stand der Technik in der Mikromontage

sind, können nicht aufgelöst werden. Verschiebungen an der Grenze zum Subpixelbereich lassen sich zum Teil durch spezielle mathematische Bildberechnungsverfahren noch erfassen, begrenzen aber den Messraum nach unten (PEDERSINI ET AL. 1997).

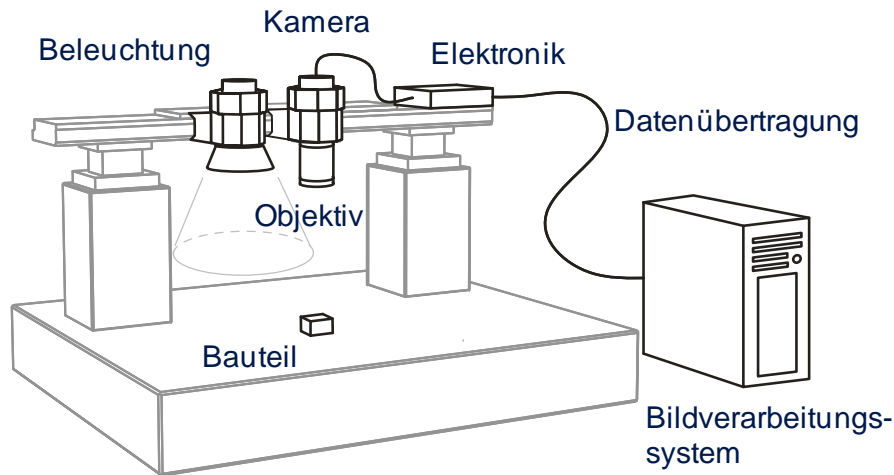


Bild 2-13: Komponenten eines bildverarbeitenden Sensorsystems in Anlehnung an SCHÖTTLER (2008) und DRIESSEN ET AL. (2004)

Prinzipbedingt liefert die einfache Bildverarbeitung allerdings nur zweidimensionale Positionsinformationen (ERNE 2005; POKAR 2004). Zur Erfassung von dreidimensionalen Topographie- oder Lageinformationen müssen zusätzliche photogrammetrische Verfahren eingesetzt werden, wie beispielsweise die Streifenprojektion (DRIESSEN ET AL. 2004; OECHSNER ET AL. 2004) oder das Multifokusprinzip (MURE-DUBOIS ET AL. 2006).

Beispiele für den Einsatz bildverarbeitender Sensorik in der Mikromontage geben BERT ET AL. (2006), DITTRICH (2004) sowie FEDDEMA & SIMON (1998 A).

2.2.5.3 Lasersensoren

Der Einsatz von Lasersensoren ist eine weitere Möglichkeit, die Bauteillageerkennung in der automatisierten Mikro- und Präzisionsmontage durchzuführen. Lasersensoren nutzen die Eigenschaften monochromatischen, kohärenten Lichts, um Entfernungen zu Oberflächen oder Bewegungen von Objekten zu detektieren. Als Laserstrahlquellen werden dabei meist frequenzstabilisierte Helium-Neon-Dauerstrichlaser eingesetzt (GEVATTER ET AL. 2006). Grundsätzlich wird zwischen den Verfahren der *Triangulation* und der *Interferometrie* unterschieden. Unabhängig vom Messprinzip sind Lasersensoren eindimensionale optische Messsysteme. Folglich können im Vergleich zu bildverarbeitenden Sensoren weniger Informationen über die Bauteillage zeitgleich erfasst werden. Allerdings besitzen Lasersenso-

2.2 Automatisierte Mikromontagesysteme

ren eine wesentlich höhere Messauflösung und -geschwindigkeit (PEGGS ET AL. 1999; SMITH ET AL. 1998; DORSCH ET AL. 1994).

Bei Triangulationssensoren wird ein Laserlichtpunkt auf eine Oberfläche projiziert und dessen Reflexion mit einer Optik auf einen ortsauflösenden Detektor abgebildet. Gemessen wird dann der Ort des Intensitätsschwerpunkts des reflektierten Lichts auf der Detektorfläche. Aus diesem Wert kann der Abstand zwischen der erfassten Oberfläche und dem Sensor berechnet werden. Durch eine Verkippung der Detektorfläche gegenüber der optischen Achse kann eine scharfe Abbildung innerhalb des gesamten Messbereichs gewährleistet werden. Zur Erfassung des reflektierten Lichtpunkts wird entweder eine Zeile aus Photodioden bzw. CCD-Elementen oder eine positionempfindliche Photodiode eingesetzt (GEVATTER ET AL. 2006). Bild 2-14 (links) zeigt schematisch den Aufbau eines Triangulationssensors.

Laserinterferometer basieren auf der lauflängenbedingten Wellenverschiebung zweier überlagerter Laserstrahlen. Von einem durch die Messlaserquelle emittierten Laserstrahl wird mittels eines halbdurchlässigen Spiegels ein Teil des Strahls ausgekoppelt, durch einen Referenzraum geleitet und mit dem vom Messobjekt reflektierten Strahl überlagert (Bild 2-14, rechts). Das entstehende Interferenzmuster ist das Maß für die Entfernung zwischen Sensor und Objekt (DEMTRÖDER 2010).

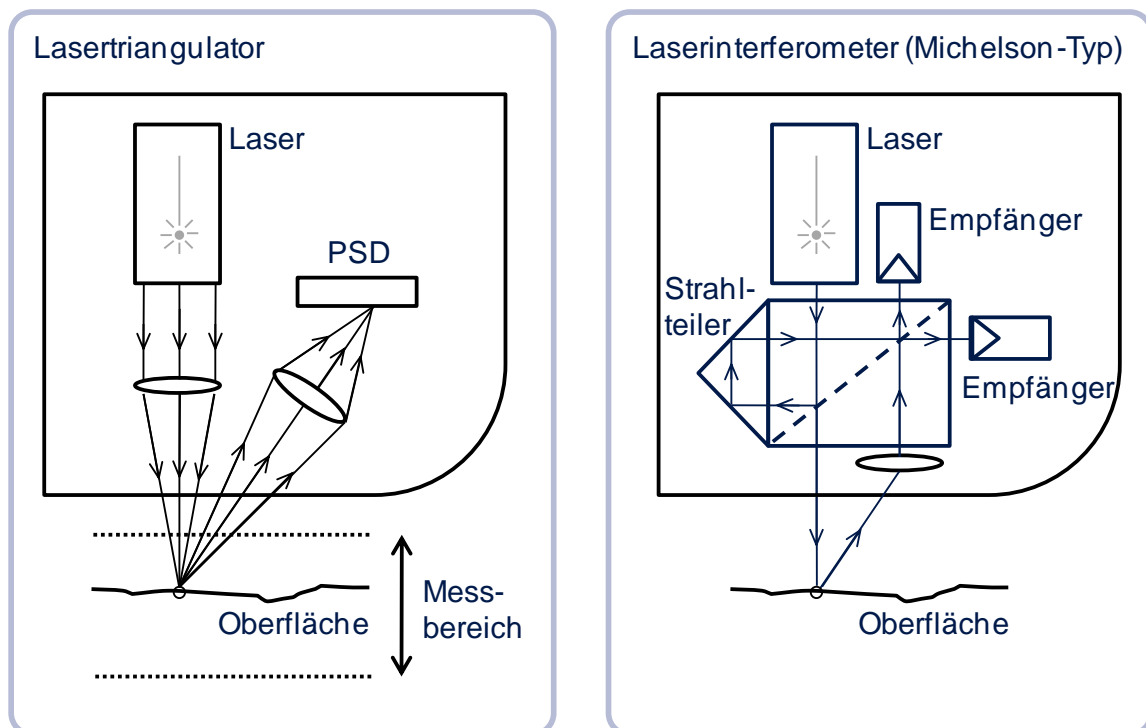


Bild 2-14: Schematischer Aufbau von Lasertriangulatoren und Interferometern in Anlehnung an GEVATTER ET AL. (2006) und ENCYCLOPEDIA BRITANNICA (2010)

Bei der Laserinterferometrie handelt es sich um ein inkrementelles Messverfahren, d.h., es können nur kontinuierliche Relativverschiebungen zwischen Objekten oder

2 Stand der Technik in der Mikromontage

zwischen einem Referenzpunkt und einem Objekt gemessen werden. Der Grund dafür liegt in der periodischen Redundanz der erzeugten Interferenzmuster. Prinzipbedingt wiederholen sich die charakteristischen Musterverläufe im Abstand der Wellenlänge der Laserstrahlung. Eine Messdistanz von mehr als einer Wellenlänge kann deshalb nur durch kontinuierliches Zählen der Musterperioden erfasst werden. Ein großer Vorteil der Laserinterferometrie ist die hohe erreichbare Messauflösung im Bereich weniger Nanometer (GEVATTER ET AL. 2006).

Lasersensoren können für die berührungslose und hochgenaue, eindimensionale Positionsbestimmung fast aller Objekte eingesetzt werden. Allerdings verursachen total reflektierende, voll transparente oder Licht-absorbierende Oberflächen sowie optisch aktive Komponenten starke Störeffekte bei der Messung. An diesen Oberflächen kommt es zu einer Lichtleitung, starken Streuung oder Reflexion des Lasers aus dem Messbereich. Dies führt zu Messfehlern oder zum kompletten Signalverlust (BOSBACH 2003).

Beispiele für den Einsatz eindimensionaler Lasersensoren in der Mikromontage geben MOHR (2005), ENIKOV ET AL. (2003), FATIKOW ET AL. (2000), HESSE ET AL. (2006) sowie JENNEWEIN ET AL. (2000). ENIKOV ET AL. (2003) und FATIKOW ET AL. (2000) kombinieren ein bildverarbeitendes Sensorsystem mit einem Lasertriangulator zur Erfassung von Tiefeninformationen. Das Montagesystem lokalisiert die zu montierenden Mikroteile oder Referenzpunkte mithilfe der Bildverarbeitung und nutzt anschließend die Abstands- und Tiefeninformationen des Lasertriangulators zum Greifen oder Absetzen. HESSE ET AL. (2006) kombinieren mehrere Laserinterferometer zur Positionsüberwachung und Regelung eines hochpräzisen, luftgelagerten und automatisierten Positioniersystems. Die Arbeiten von JENNEWEIN ET AL. (2000) befassen sich mit der absoluten interferometrischen Distanzmessung durch Überlagerung mehrerer Lichtwellenlängen. Die Schwebungswellenlänge zweier überlagerter Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen (λ_1 und λ_2), die so genannte synthetische Wellenlänge, erlaubt eine absolute Positionsmessung im Bereich der halben synthetischen Wellenlänge. Je nach Emissionscharakteristik der eingesetzten Laserdioden kann so ein absoluter Messbereich von bis zu einem Meter Sensorabstand erreicht werden. Neben der Messung von Absolutdistanzen liegt der Fokus der Arbeiten auf der reflektorfreien Erkennung beliebiger technischer Oberflächen.

In industriellen Mikromontagesystemen werden je nach Systemaufbau und Sensor-konzept sowohl Triangulatoren als auch Interferometer zur hochpräzisen Einpunktmessung eingesetzt.

2.2.5.4 Taktile Sensoren

Taktile Sensoren sind alle Sensoren, die zur Erfassung der Messgröße einen physischen Kontakt zum Messobjekt herstellen. Aufgrund der Empfindlichkeit der meisten Mikrokomponenten gegenüber Berührung und mechanischen Belastungen werden sie in Mikromontagesystemen vor allem zur Messung von Greif- und Anpresskräften in mechanischen Mikrogreifern genutzt (BEYELER ET AL. 2007; VOYLES ET AL. 2005; CARROZZA ET AL. 2000; HESSELBACH ET AL. 1997). Zur Bestimmung der Bauteillage und zur Bauteilpositionierung werden taktile Sensoren nur selten eingesetzt, da die Berührung von Mikrokomponenten außerhalb dafür vorgesehener Kontaktflächen zu deren Beschädigung führen kann.

Trotzdem werden in Einzelfällen taktile Sensoren zur Bauteilpositionierung verwendet. ZESCH ET AL. (1998) beschreiben ein Feinjustagesystem, das auf einer taktillen Positions- und Schubkraftmessung basiert. Mikrokomponenten, deren Grobposition bekannt ist, werden dabei mittels einer piezoresistiven Cantileverspitze an ihre Zielposition geschoben. Die aus der Rasterelektronenmikroskopie stammende Tastspitze sensiert sowohl den Bauteilkontakt als auch die Schubkraft. Zusammen mit zusätzlichen Informationen über Schwerpunktlage, Tribologie und Oberflächenladung kann dann über geeignete Algorithmen die Bauteillage bestimmt werden.

2.3 Methoden zur hochgenauen Relativpositionierung

2.3.1 Sensorübergreifende Positionierungsstrategien

In vielen Fällen reichen einfache Sensorsysteme und Standardtechnologien zur Bauteilpositionierung nicht aus, um hybride Mikrosysteme ausreichend genau zu montieren (BARGIEL ET AL. 2010; PFEIFER ET AL. 2001). Dies ist sowohl auf die schlechte Zugänglichkeit der Fügezonen bei der Montage hochintegrierter Systeme (REINHART ET AL. 2009A) und die hohe geforderte Positioniergenauigkeit (DRIESSEN ET AL. 2004) als auch auf die geringe Größe und die hohe Empfindlichkeit der Mikrokomponenten zurückzuführen (SANTOCHI ET AL. 1998). Darüber hinaus erfordern neue MEMS und MOEMS zunehmend eine Bauteiljustage in sechs räumlichen Freiheitsgraden (HESSELBACH ET AL. 2008; BÜTTGENBACH ET AL. 2006) und die relative Ausrichtung optisch aktiver Strukturen zueinander (SCHELLER 2001). Es ist daher notwendig, für die automatisierte Montage komplexer Mikrosysteme sensorübergreifende Strategien für die hochgenaue Relativpositionierung zu entwickeln. Dabei werden die Informationen mehrerer Sensoren kombiniert oder die Merkmale der Mikrosysteme analysiert und zur Bauteilpositionierung genutzt.

2 Stand der Technik in der Mikromontage

In Abschnitt 2.3 werden erfolgreich eingesetzte Methoden zur hochgenauen Relativpositionierung von Mikroteilen bei der automatisierten Montage vorgestellt. Je nach Anwendungsfall lassen sich die Technologien nur auf ein bestimmtes Produkt anwenden oder aber für eine ganze Gruppe ähnlicher Mikrosysteme nutzen. Die Übertragbarkeit hängt dabei von den eingesetzten Fügeverfahren, den Wirkprinzipien der Sensorik, dem Einsatzspektrum der Produkttechnologien und von den montierten Mikrokomponenten ab.

2.3.2 Eigenausrichtung

Als Eigenausrichtung bezeichnet man in der Mikromontage *Verfahren, bei denen sich Bauteile ohne direkte Einwirkung zusätzlicher Systemkomponenten selbst justieren*. Grundsätzlich lassen sich dabei zwei Funktionsprinzipien unterscheiden, die *passive* und die *aktive* Eigenausrichtung. Methoden der passiven Eigenausrichtung nutzen die Gesetzmäßigkeit des zweiten thermodynamischen Hauptsatzes, indem Mikrokomponenten so zusammengebracht werden, dass der energetisch vorteilhafteste Zustand der Bauteilkombination der gewünschten Montageposition entspricht (SCHWABL 2006). Positionsbestimmende Faktoren können beispielsweise Geometrie oder Oberflächenbeschaffenheit sein. Im Gegensatz dazu werden für die aktive Eigenausrichtung spezielle Aktoren in Mikrokomponenten integriert, die nach ihrer Aktivierung die Komponenten zueinander positionieren. Diese Aktoren dienen ausschließlich der Justage während der Montage und werden in der Regel durch die eingesetzten Fügeverfahren inaktiviert.

TERFORT ET AL. (1997) übertragen ein ursprünglich aus der Molekularbiologie stammende Technologie zur passiven Eigenausrichtung auf die Mikromontage. Das Verfahren basiert auf einer Kombination aus Formkontur-Übereinstimmung und Wasseraffinität der Bauteiloberfläche. Durch gezielte Oxidation von Polyurethanbauteilen können deren ansonsten hydrophobe Oberflächen hydrophilisiert werden. Mit dieser Methode lassen sich die Fügeflächen der Mikrokomponenten hydrophob, die Außenflächen hydrophil gestalten. Zusätzlich wird die Kontur der Fügestelle geometrisch so gestaltet, dass deren Passform nur eine Bauteilausrichtung zulässt. Zur Montage werden die Bauteile mit einer geringen Menge einer Emulsion aus destilliertem Wasser und einem hydrophoben, UV-aushärtendem Klebstoff durchmischt. Die Emulsion wirkt dabei als Schmierstoff und benetzt die hydrophoben Flächen mit dem UV-Klebstoff. Aufgrund der Konditionierung der Fügeflächen legen sich die Mikrokomponenten von selbst in der passenden Orientierung ineinander. Durch die Bestrahlung mit ultraviolettem Licht werden die Bauteile abschließend fest miteinander verbunden. Bild 2-15 (a) zeigt die erfolgreiche Montage eines Beispielbauteils in Form einer Mikrolinse.

2.3 Methoden zur hochgenauen Relativpositionierung

Ein weiteres Verfahren zur passiven Eigenausrichtung beschreiben HARSH ET AL. (1999). Zur Montage dreidimensionaler MEMS werden flache monolithisch gefertigte und durch eingeztete Feststoffgelenke verbundene Siliziumstrukturen an ihren Verbindungsstellen mit oxidfreien Lotkugeln von einem Durchmesser von 100 bis 400 μm bestückt. Während des anschließenden Reflow-Prozesses schmelzen die Lotkugeln und die Oberflächenspannung der entstehenden Lottropfen führt zum Aufklappen der unterstützten Substratstrukturen. Der gewünschte Winkel kann über die Lotmenge eingestellt werden. Durch die zusätzliche Integration von Stützstrukturen, die sich beim Schmelzen des Lots mit aufrichten, kann eine Genauigkeit des Aufstellwinkels von $\pm 0,3^\circ$ erreicht werden. Bild 2-15 (b) zeigt Substratkomponenten, Stützstrukturen und einen erstarrten Lottropfen.

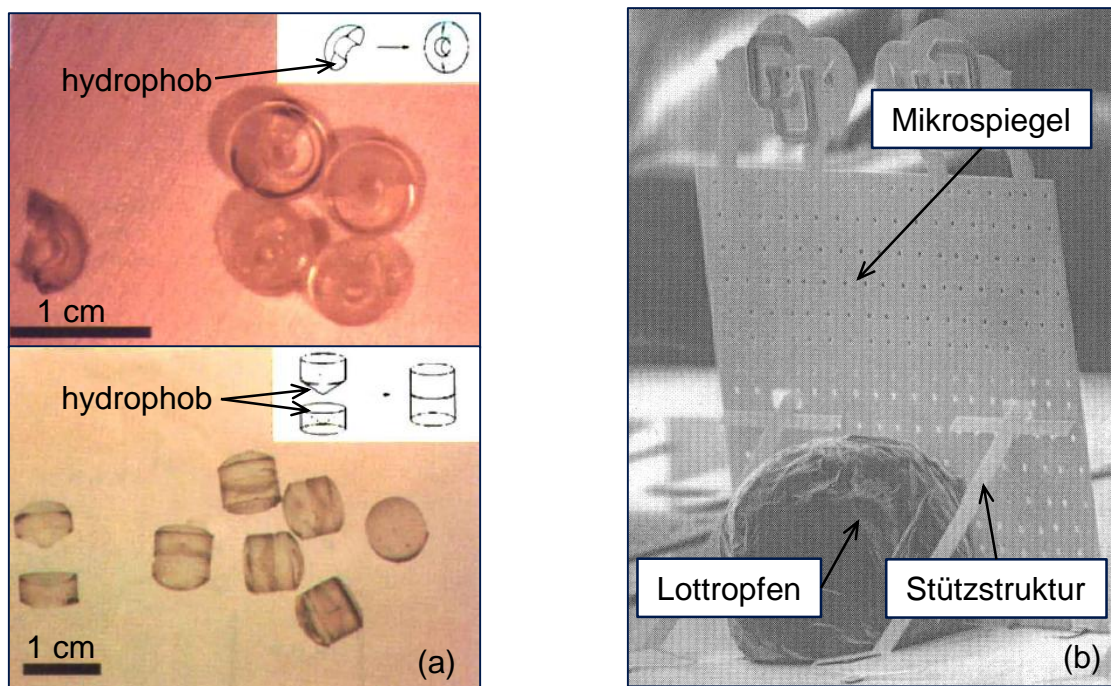


Bild 2-15: Beispiele für passive Eigenausrichtung: (a) Ausrichtung über hydrophobe Konditionierung der Fügeflächen (TERFORT ET AL. 1997); (b) Ausrichtung durch die Oberflächenspannung von Lottropfen (HARSH ET AL. 1999)

Ein Beispiel für die aktive Eigenausrichtung bei der Montage optischer Mikrokomponenten ist der Einsatz von geätzten V-Gräben in Glasfaserkopplern in Kombination mit einem piezoresistiven Cantilever zur Faserausrichtung (TICHEM ET AL. 2003). Dabei werden die beiden freien, zu verbindenden Glasfaserenden unter geringem Druck über die Oberfläche des Faserkopplers gerollt. Die Fasern kommen in den v-förmigen Vertiefungen des Koppelmoduls zum Liegen und sind so radial zu einander an einem monolithisch in das Trägersubstrat integrierten Piezo-Cantilever ausgerichtet. Der Piezoaktor wird anschließend genutzt, um ein Faserende in axialer Richtung zu verschieben und die Glasfasern zueinander auszurichten.

2.3.3 Falt- und Klapptechniken

Eine weitere sehr präzise Methode dreidimensionale Mikrostrukturen und Funktionskomponenten auszurichten, ist die Falt- und Klapptechnik. Ähnlich wie bei der Anfertigung eines Origami-Modells werden hier plane, monolithisch gefertigte Strukturen, die durch spezielle Feststoff-, Scheren- oder Substratgelenke verbunden sind, aufgeklappt und zu räumlichen Strukturen gefaltet. Klick-Verbinder, die in die freien Enden der Faltstrukturen eingätzt sind, fixieren die aufgebauten Mikrokomponenten in ihrer Form und Lage (YEH ET AL. 1996). Der Übergang zwischen dem Prinzip der Eigenausrichtung (vgl. Abschnitt 2.3.2) und einer Bauteilpositionierung durch Handhabungsvorrichtungen eines separaten Montagesystems ist dabei fließend, da zum Aufklappen sowohl mikrosystemeigene Aktoren als auch Aktoren des Montagesystems geeignet sind. Auch über die Verwendung von gezielten Luft- oder Flüssigkeitsströmungen wird diskutiert (PISTER ET AL. 1992). Da bei den Falt- und Klapptechniken die Position der Faltabschnitte, die Lage der Klappscharniere sowie die Verbindung von Scharnieren und Strukturelementen monolithisch auf einem Substrat gefertigt werden, kann eine Positioniergenauigkeit erreicht werden, die im Bereich der Toleranzen von Halbleiterfertigungsverfahren liegt.

Ein Beispiel für den Aufbau hybrider Mikrosysteme mittels Falttechniken ist die Montage von beweglichen Spiegeln für Laserscanner. REID ET AL. (1998) und MULLER ET AL. (1998) stellen ein System vor, das einen beweglichen Mikrospiegel durch systemeigene Aktoren aufklappt. Der Spiegel rastet dabei in eine Stützstruktur ein, die ihn in der aufgestellten Position arretiert. Ein ähnliches Montageprinzip verfolgen TIEN ET AL. (1996). Allerdings stellen sie die beweglichen Mikrospiegel nicht durch systemeigene Aktoren, sondern teleoperativ über ein spezielles Handhabungssystem auf. Bild 2-16 zeigt einen MEMS-Spiegel innerhalb eines Mikrospektrometers, der mit der von MULLER ET AL. (1998) entwickelten Klapptechnik montiert wurde. Er wurde monolithisch in das Trägersubstrat integriert und anschließend durch den systemeigenen Aktor aufgeklappt und durch Klickverbindungen in den Gelenken fixiert.

Neben den vorgestellten optischen Mikrosystemen lässt sich eine Bandbreite weiterer Mikrosysteme mithilfe der Falt- und Klapptechnik aufbauen. YEH ET AL. (1996) setzen tragende Stütz- und Ankerstrukturen für Mikromanipulatoren zusammen, PISTER ET AL. (1992) montieren Mikro-Anemometer, Mikrokräftensensoren und Mikrogreifer mit dieser Technologie.

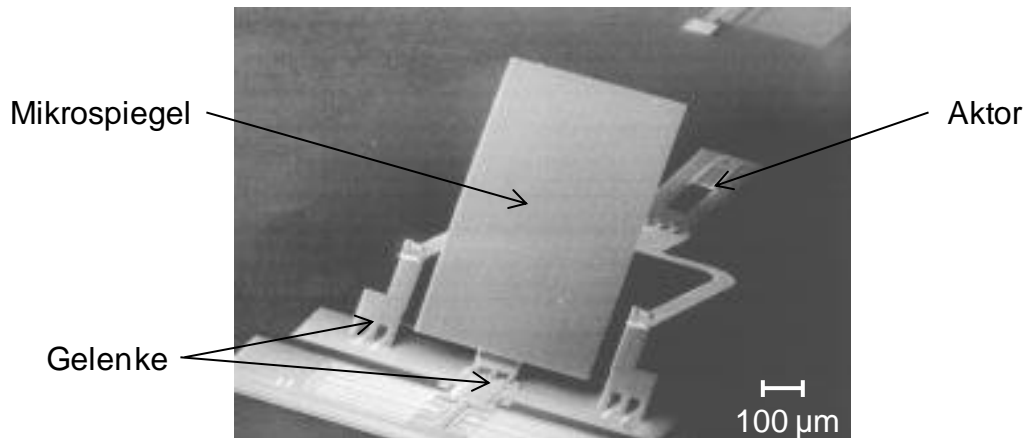


Bild 2-16: Durch Klapptechniken montierter Mikrospiegel (MULLER ET AL. 1998)

2.3.4 On-the-machine-assembly

Nach der Fertigung von Mikrobau­teilen, beispielsweise mit monolithischen Prozessen, gehen in der Regel alle bei der Fertigung bekannten Informationen über dessen Lage und Ausrichtung verloren. Bei der anschließenden Montage müssen diese Informationen durch spezielle Greifer, Spannvorrichtungen und Sensorsysteme neu ermittelt werden. Dieses Problem umgeht die Methode „*On-the-machine-assembly*“, indem die Teile auf derselben Maschine gefertigt und montiert werden (VAN BRUSSEL ET AL. 2000).

LANGEN ET AL. (1995) beschreiben ein System zur Mikrofunktenerosion, das sowohl Mikrowerkzeuge und -bauteile fertigen als auch einfache Montageoperationen durchführen kann. Bei der Fertigung und Montage eines Rotors für einen elektromagnetischen Mikromotor wird die Rotorachse zuerst als Elektrode bzw. Werkzeug eingesetzt, um eine Zentralbohrung in den Rotor zu erodieren. Anschließend wird sie in das erzeugte Loch eingesteckt und durch ein Widerstandsschweißverfahren gefügt. Ein Vorteil dieses Verfahrens, der sich besonders auf die Positioniergenauigkeit auswirkt, ist die nahezu toleranzfreie Passung der beiden Fügepartner. Bei der abtragenden Fertigung der Achsbohrung kommt es zu einem geringfügigen Elektrodenabtrag. Dadurch passen sich die Achse, die im Fertigungsschritt als Elektrode dient, und die Zentralbohrung genau aneinander an.

Bei der Mikro-Erosion können, zusätzlich zu den abtragenden Prozessen, Strukturen durch eine gezielte Materialabscheidung am Ort der Potentialentladung generativ aufgebaut werden. MASUZAWA ET AL. (1997) nutzen dieses Verfahren für den Aufbau eines kombinierten Fertigungsmontagesystems, mit dem sich sowohl Werkzeuge als auch Mikrokomponenten hochgenau fertigen und montieren lassen.

2.3.5 Preadjusted assembly magazines

Einen ähnlichen Ansatz wie das „On-the-machine-assembly“ verfolgt die Montagestrategie „Preadjusted assembly magazines“. Auch hier wird die Bauteillage von der Fertigung bis zur Montage aufrechterhalten. Allerdings wird die Montage nicht auf der Fertigungsmaschine durchgeführt, sondern die relative Lage der verschiedenen Bauteile zueinander wird noch während der Fertigung in speziellen Magazinen fixiert. Dafür werden Mikrokomponenten monolithisch so aufgebaut, dass ihre Fügeflächen auf dem Trägersubstrat liegen. Anschließend wird die Oberseite der Komponenten mit einem speziellen Harz vergossen, das in Füge­richtung eine geringe Bauteiladhäsion aufweist. So entsteht ein hochgenau angepasstes Magazin aus Kunstharz. Im folgenden Schritt wird das Trägersubstrat durch Ätz- oder Feinschliffverfahren abgetragen und die Mikrokomponenten werden freigelegt. Ihre Relativposition ist durch das Kunstharz nach wie vor fixiert. Da das Harz eine in Füge­richtung geringe Adhäsionswirkung hat, können die Komponenten bei der Montage positionsgenau aus dem Magazin ausgestochen werden (VAN BRUSSEL ET AL. 2000). Wird das Magazin an drei Referenzmarken ausgerichtet, ist die Lage aller zu montierenden Komponenten definiert. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist, dass für die Handhabung des Magazins keine speziellen Mikrogreifer notwendig sind. Die Technologie ist zudem für eine Montage im Batch-Prozess geeignet. Ein Beispiel für den Einsatz vorjustierter Montagemagazine ist die Montage von Mikro­zahn­rädern in ein Mikrogetriebe (BEGEMANN ET AL. 1998).

2.3.6 Stereophotogrammetrie

Eine Möglichkeit, die Position von Bauteilen bei der Montage berührungslos in sechs räumlichen Freiheitsgraden zu erfassen, ist der Einsatz von *bildverarbeitenden Systemen, die in der Lage sind, mehrperspektivische Aufnahmen zu erzeugen*. Dabei muss ein Bauteil aus mindestens zwei verschiedenen Blickwinkeln vollständig aufgezeichnet werden.

Eine sehr kompakte Bauweise eines stereophotogrammetrischen Systems stellen BÜTTGENBACH ET AL. (2006) vor. Durch die Anordnung eines Reflexionsprismas zwischen zwei flachen, angestellten Spiegeln, werden Bilder aus zwei verschiedenen Perspektiven in eine Kameralinse mit lediglich 12 mm Durchmesser projiziert (Bild 2-17). Der eingesetzte Bildverarbeitungsalgorithmus basiert auf der Kantenerkennung nach TABATABEI & MITCHEL (1984) und der Methode zur Stereobildüberlagerung nach LUHMANN (2000).

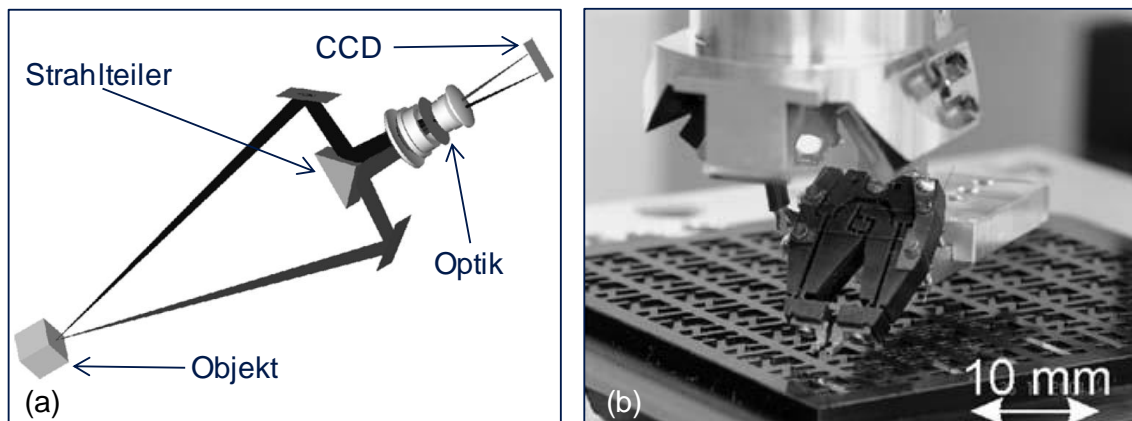


Bild 2-17: Stereophotogrammetrisches Objektiv (BÜTTGENBACH ET AL. 2006): (a) Funktionsmodell; (b) Einsatz in der Mikromontage

Sofern die relevanten Strukturen und Konturen nicht durch Produktkomponenten abgeschattet sind, lassen sich mit diesem Sensorsystem Bauteilform und -lage in einem Messraum von 11 mm x 5,5 mm erkennen. Die Genauigkeit der Positionserkennung liegt dabei im Bereich von ca. 0,1 μm .

2.3.7 Infrarot-Durchlicht

Viele der in halbleiterbasierten Mikrosystemen eingesetzten Materialien werden oberhalb einer bestimmten Wellenlänge transparent. Der Transparenzbereich von Silizium beispielsweise liegt zwischen $\lambda = 1200$ und $\lambda = 1500$ nm, der von Galliumarsenid zwischen $\lambda = 890$ und $\lambda = 1700$ nm (HOFFMANN 1997). *Mikrokomponenten aus diesen Werkstoffen können, eine geeignet Infrarotbeleuchtung vorausgesetzt, mit einer Infrarotkamera durchleuchtet werden.* Durch Kombination dieser Elemente mit einem IR-transparenten Greifer und deren Integration als bildgebendes Sensorsystem in eine Mikromontageanlage, erhält man Zugang zu den Strukturen auf den Bauteilunterseiten. Auch die Kontur der darunterliegenden Baugruppe lässt sich so visualisieren. Marken oder Funktionsstrukturen aus nicht IR-transparenten Materialien können dann als Referenzpunkte für die relative Positionierung der Bauteile zu der Baugruppe genutzt werden (JACOB 2002).

In der Mikromontage werden bei bildgebenden Sensorsystemen zusätzlich zu den Kameras oft vergrößernde Optiken oder Objektive eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.5.2). Daraus ergeben sich spezielle Anforderungen an die Systemtechnik bei der Relativpositionierung mittels Infrarot-Durchlicht. Voraussetzung für die hochgenaue Justage ist eine Vorpositionierung des Bauteils zur Baugruppe im Bereich der Tiefenschärfe der Optik. Durch die im Vergleich zum sichtbaren Licht wesentlich längeren Wellenlängen des Infrarotbereichs kommt es zu einer starken Reduktion des Auflösungsvermögens U der Optik. Nach ABBE (1904) gilt der Zusammenhang:

$$U = \frac{A}{\lambda_l} \quad (2.1)$$

Dabei steht A für die numerische Apertur der Optik, die direkt proportional zu deren Öffnungswinkel ist, und λ_l für die Wellenlänge des Lichts. Bei einer Verdoppelung der Wellenlänge von $\lambda_l = 600$ nm des sichtbaren Lichts auf die Wellenlänge $\lambda_l = 1200$ nm des Lichts im IR-Nahbereich halbiert sich das Auflösungsvermögen U . Die Messgenauigkeit des Sensorsystems sinkt damit stark ab. Dieser Effekt kann allerdings durch eine Anpassung der Geometrie der Optik an die speziellen Anforderungen aus dem IR-Nahbereich reduziert werden.

Ein Vorteil des Sensorsystems liegt in der Möglichkeit, die Ausrichtung der Bauteile auch nach einer abgeschlossenen Fügeoperation zu messen. Dies kann gezielt zur Qualitätssicherung im Montageprozess genutzt werden (JACOB 2002).

2.3.8 Lagebestimmung auf Basis von CAD-Daten

Wie bei der Stereophotogrammetrie handelt es sich bei der CAD-Daten-basierten Bauteillagebestimmung um ein bildgestütztes Verfahren zur Positionsbestimmung. Dabei extrahiert ein mathematischer Algorithmus aus einem Kamerabild eine Kontur, die mit den CAD-Informationen des zu erkennenden Bauteils verglichen wird. So kann die perspektivisch korrekte Lage von Bauteilen relativ zur Kameraposition erkannt und deren Initialposition im Arbeitsraum des Mikromontagesystems bestimmt werden (ROSENHAHN 2003). Bild 2-18 (a) zeigt die berechnete Überlagerung der CAD-Kontur eines Mikrozahnrad mit einer Mikroskopaufnahme des Mikrobauteils aus dem Arbeitsraum eines Mikromontagesystems. Im Gegensatz zur Stereophotogrammetrie kommt die CAD-Daten-basierte Bauteillagebestimmung mit nur einer Kamera aus.

Einer der ersten Ansätze zur CAD-Daten-basierten Bauteillagebestimmung in der Mikromontage geht auf FEDDEMA & SIMON (1998A) zurück. Sie nutzen CAD-Modelle der Mikrokomponenten für eine schnelle Objekterkennung. Aus den CAD-Informationen werden virtuelle, perspektivische Ansichten der Bauteile abgeleitet und mit den realen Bildern verglichen. So kann die Lageerkennung unterstützt und die im Bild erkennbare Kontur bestimmten Bauteilen zugeordnet werden. Darüber hinaus charakterisieren FEDDEMA & SIMON (1998B) ein Montagesystem mit vier räumlichen Freiheitsgraden sowie kontinuierlicher, visueller und zweidimensionaler Erfassung von Bauteilpositionen. Dabei werden aus den CAD-Daten eines Bauteils Kontureigenschaften extrahiert und ein synthetisches Optimalbild erzeugt. Das künstlich erzeugte Bild wird anschließend über das reale Bild aus dem Arbeitsraum der Anlage gelegt. Durch eine entsprechende Positionierung der Handhabungssys-

2.3 Methoden zur hochgenauen Relativpositionierung

teme werden die beiden Bilder dann zur Deckung gebracht. Neben der automatisierten Verarbeitung von CAD-Daten liegt der Schwerpunkt der Arbeiten von FEDDEMA & SIMON (1998B) auf der Simulation der optischen Apertur und der automatischen Fokuseinstellung der Optik der eingesetzten CCD-Kamera. Das Gesamtsystem erreicht eine theoretische x-y-Genauigkeit von einem Mikrometer. Sub-Mikrometer-Verschiebungen können aufgrund der Auflösung des Kamerabilds und der geringen Tiefenschärfe nicht detektiert werden.

PROBST ET AL (2006) und KRATOCHVIL ET AL. (2004) beschreiben ein automatisiertes Mikromontagesystem, bei dem zur Erkennung der Initialpose von Mikrokomponten das Verfahren nach ROSENHAHN (2003) eingesetzt wird. Zur anschließenden Bauteilverfolgung wird dann auf ein Tracking-Verfahren nach YESIN (2005) zurückgegriffen. Der Vorteil dieser Kombination liegt in der Echtzeitfähigkeit des Tracking-Algorithmus. Ausgehend von einer bekannten Bauteilposition kann dieser mit einer Frequenz von 30 Hz Positionsänderungen erfassen, die Informationen aufbereiten und dem Montagesystem zur Verfügung stellen. Um eine mögliche Abschattung der Bauteile durch Handhabungskomponenten im Kamerabild zu verhindern, verfügt das Mikromontagesystem außerdem über drei Kameras an unterschiedlichen Aufnahmepositionen. Die Genauigkeit der Bauteillagererkennung des Gesamtsystems liegt bei einem Mikrometer.

Darauf aufbauend entwickelten TAMADAZTE ET AL. (2009) ein System zur dreidimensionalen Bauteillagebestimmung. Sie stellen ein teleoperatives Mikromontagesystem vor, das durch ein zweidimensionales Kamerabild die Bauteillage basierend auf CAD-Daten in sechs räumlichen Freiheitsgraden bestimmt sowie die Bauteilkontur und die Zielposition des Bauteils als 3D-Drahtgitter-Struktur in das Bild des Operators einblendet [Bild 2-18 (b)]. So gibt das System dem Operator eine Hilfestellung bei der Beurteilung der aktuellen Bauteillage relativ zur Zielposition. Mit diesem Aufbau konnte eine Montagegenauigkeit von 1,4 μm erreicht werden.

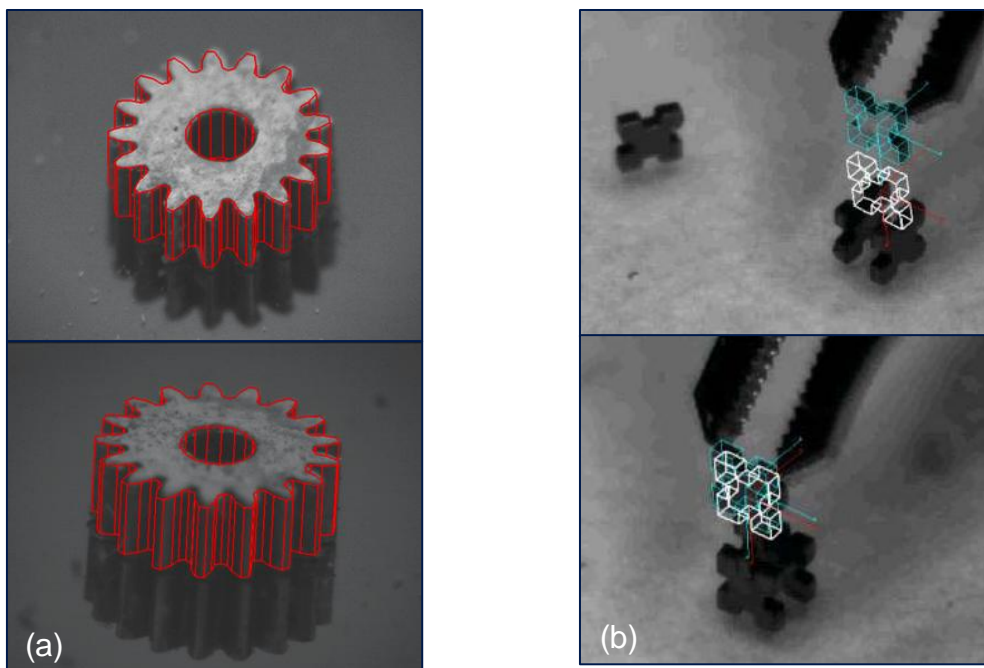


Bild 2-18: Lagebestimmung unterstützt durch CAD-Daten: (a) Bestimmung von Kameraperspektive und Lage eines Mikrozahnrads durch Einpassen in die zugehörige CAD-Drahtgitter-Struktur (KRATOCHVIL ET AL. 2004); (b) Dreidimensionale Illustration der Ist-Lage und der Soll-Lage (TAMADAZTE ET AL. 2009)

2.3.9 Diametrale Bildüberlagerung

Ein weiteres bildgebendes Verfahren zur Positionsbestimmung ist die Verarbeitung überlagerter, diametraler Aufnahmen der Fügeflächen zweier Bauteile. Durch den Einsatz von Strahlteileroptiken mit diametralen optischen Achsen, die zwischen die zu fügenden Mikrokomponenten eingebracht werden, können Referenz- oder Funktionsstrukturen auf den Fügeflächen der Bauteile zueinander ausgerichtet werden (COOPER ET AL. 1998). Die Strahlteileroptik nimmt dabei beide Fügeflächen simultan auf und überlagert die Bilder der gegenüberliegenden Strukturen. Dadurch befinden sich beide Bauteile während der gesamten Montageoperation ständig im Sichtfeld der Optik. Eine Lagekorrektur kann so in einem geschlossenen Regelkreis zwischen Sensor- und Handhabungssystem durchgeführt werden (HÖHN 2001). Auch bei der Montage von Flip-Chip-Bauelementen oder unterseitenstrukturierten optischen Komponenten haben Strahlteileroptiken Vorteile. Wird die Optik zwischen die Fügeflächen eingebracht, können Strukturen auf der Bauteilunterseite erkannt werden (JACOB 2002). Bild 2-19 zeigt schematisch die Funktionsweise der Relativpositionierung mittels Strahlteileroptiken.

Im Gegensatz zu den Verfahren der Bauteillagebestimmung auf Basis von CAD-Daten oder der Stereophotogrammetrie, die Positionsinformationen in sechs räumli-

2.3 Methoden zur hochgenauen Relativpositionierung

chen Freiheitsgraden liefern, können Bauteile durch den Einsatz von diametralen Optiken nur in drei räumlichen Freiheitsgraden hochgenau positioniert werden. Diese Freiheitsgrade sind die beiden Translationen parallel zur Bildebene sowie die Orientierung um die zur Bildebene orthogonale Achse. Die diametrale Bildüberlagerung ist damit nicht geeignet, Montageoperationen durchzuführen, die Bauteilpositionierungen in sechs räumlichen Freiheitsgraden erfordern.

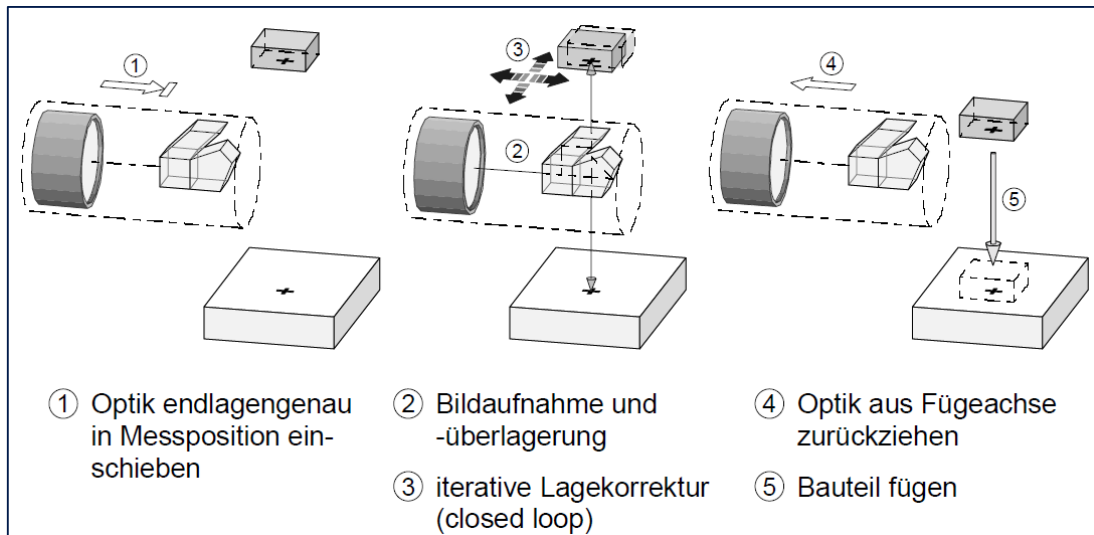


Bild 2-19: Vorgehen bei der Positionierung mithilfe der Überlagerung diametraler Aufnahmen (HÖHN 2001)

Die Genauigkeit der Positionierung durch eine diametrale Bildüberlagerung hängt nach JACOB (2002) von den stochastischen Winkelfehlern beim Einschieben der Optik, vom Winkelfehler der eingesetzten Optik, vom Absorptionsgrad der strahlführenden Elemente und vom Grad der Verzerrung des Maßstabs durch die strahlformenden Komponenten ab. Letzterer kann nach HÖHN (2001) beim Einsatz objektseitig telezentrischer Objektive vernachlässigt werden. Mit einer Paralleloptik als Strahlteiler konnte JACOB (2002) eine Positioniergenauigkeit von $\pm 3,84 \mu\text{m}$ erreichen. Diese Optik weist mit $0,0157^\circ$ einen größeren Winkelfehler als bewegte Spiegel oder koaxiale Optiken auf. Allerdings besitzt sie sehr gute Eigenschaften hinsichtlich bewegter Masse, Aufnahmezeit, Möglichkeit der Bildüberlagerung und simultaner Bildaufnahme. Diese Faktoren prädestinieren sie, trotz des im Vergleich zu koaxialen Optiken größeren Winkelfehlers, für einen Einsatz zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der automatisierten Mikromontage.

2.3.10 Dreistrahlinterferometer

Neben bildgebenden Verfahren haben sich vor allem laserbasierte optische Technologien zur hochgenauen Positionierung von Mikrokomponenten etabliert (vgl. Ab-

2 Stand der Technik in der Mikromontage

schnitt 2.2.5.3). Ein auf der Interferometrie basierendes System zur Bestimmung von Positionsinformationen in sechs räumlichen Freiheitsgraden ist das Dreistrahlinterferometer. Dabei handelt es sich um ein System aus drei zueinander ausgerichteten Interferometern, die drei Messpunkte gleichzeitig bis zu 0,1 nm genau erfassen. Durch die Koordinaten dieser drei Punkte ist die Lage der erfassten Ebene eindeutig bestimmt. Aufgrund einer möglichen gegenseitigen Überlagerung der drei Lasersignale ist mit dem Dreistrahlinterferometer nur eine Messung auf stark reflektierenden Oberflächen möglich. PÖSCHEL ET AL. (2006) und JOHN ET AL. (2005) beschreiben Dreistrahlinterferometer, deren Wegmessbereiche bis zu 2 m betragen und deren Winkelmessbereiche bei ca. $\pm 0,04^\circ$ liegen. Als Laserquelle kommt in beiden Fällen ein Jod-stablisierter He-Ne-Laser zum Einsatz. Bild 2-20 zeigt den Sensorkopf eines Dreistrahlinterferometers der Firma SIOS Messtechnik GmbH und verdeutlicht das Messprinzip anhand einer Skizze.

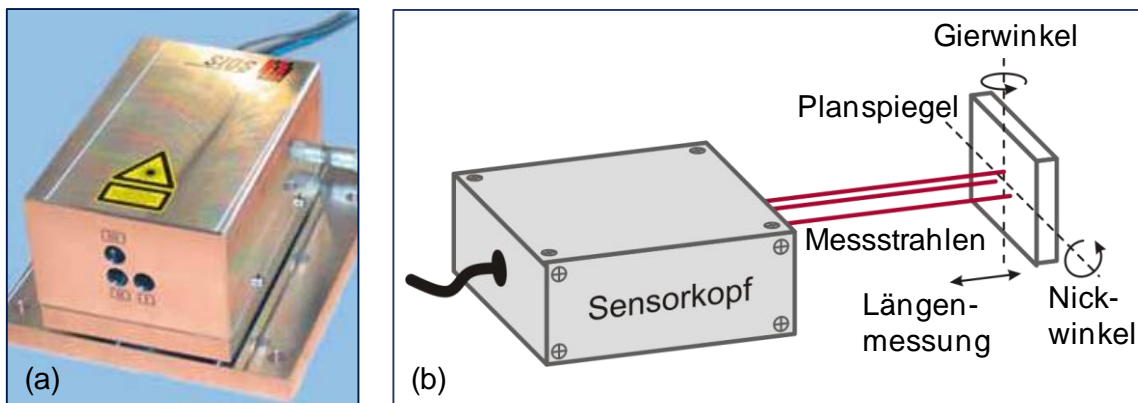


Bild 2-20: Dreistrahlinterferometer: (a) Kommerziell erhältlicher Messkopf (SIOS MESSTECHNIK GMBH 2010); (b) Funktions-skizze (PÖSCHEL ET AL. 2006)

Soll die Position eines Objektes in sechs räumlichen Freiheitsgraden bestimmt werden, muss es aufgrund des kleinen Winkelmessbereichs vorher zum Dreistrahlinterferometer ausgerichtet werden. Dies ist durch den Einsatz entsprechend genauer kinematischer Achsen möglich (vgl. Abschnitt 2.2.3). Absätze oder Kanten in der bestrahlten Objektoberfläche können zu Messfehlern führen. Deshalb sind für eine zuverlässige Bauteilpositionierung genaue Kenntnisse über die Geometrie des Objekts notwendig. Aus diesen Gründen sind Dreistrahlinterferometer vor allem für Systeme geeignet, die sich genau kalibrieren lassen. JÄGER ET AL. (2006) setzen ein Dreistrahlinterferometer beispielsweise zur Positionsbestimmung und Abbe-Fehler-Kompensation in Hochpräzisionsachsen ein.

2.3.11 Laser-Marker-Erkennung

Eine weitere laserbasierte Methode zur Positionsbestimmung in sechs räumlichen Freiheitsgraden ist die Laser-Marker-Erkennung (PARK ET AL. 1999). Ähnlich wie

2.3 Methoden zur hochgenauen Relativpositionierung

bei vielen bildgebenden Verfahren werden dabei Bauteilpositionen anhand von Markern erkannt, die bereits bei der Fertigung mit der Genauigkeit monolithischer Verfahren in die Bauteile integriert wurden. Als Marker dienen im Fall der Laser-Marker-Erkennung spezielle pyramidenförmige dreiseitige Spiegel (Bild 2-21, oben links). Zur Positionsbestimmung werden die Spiegel von einem Helium-Neon-Laser angestrahlt. Dabei teilt sich der Laserstrahl in drei Teilstrahlen auf, die über drei PSD-Sensoren erfasst werden. Diese detektieren die Koordinaten des Strahlauffreffpunkts sowie die Strahlintensität des auftreffenden Laserlichts. Ersteres dient der Positionsberechnung, Letzteres der Ausrichtung der Laserquelle mittig zum Pyramidenspiegel. Bild 2-21 zeigt den grundlegenden Sensoraufbau.

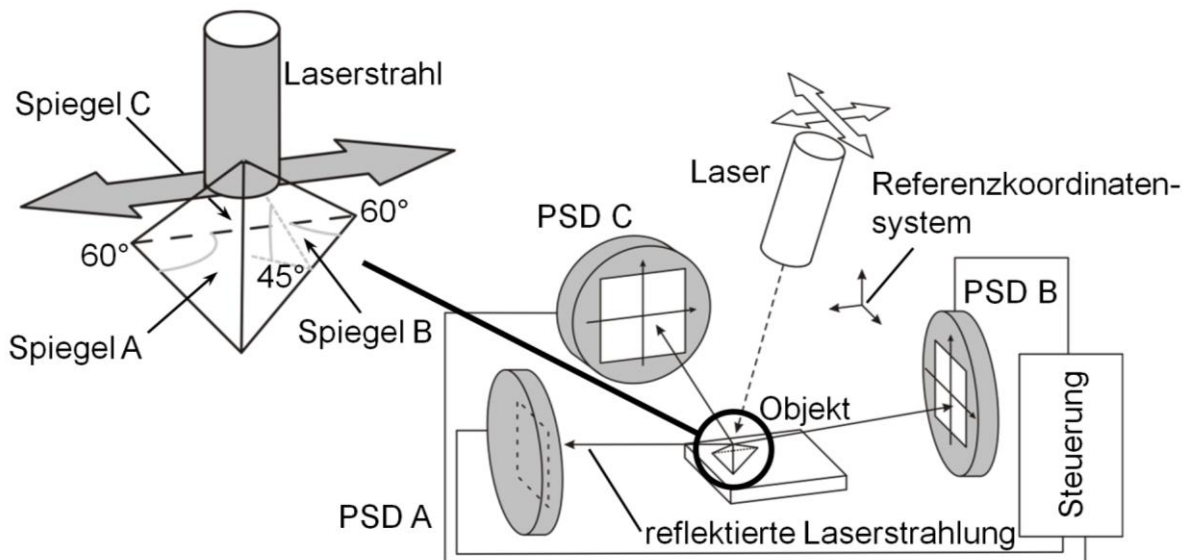


Bild 2-21: Funktionsskizze der Laser-Marker-Erkennung in Anlehnung an PARK ET AL. (1999)

PARK ET AL. (1999) stellen ein mathematisches Modell für die Berechnung der optisch geometrischen Zusammenhänge bei der Laser-Marker-Erkennung vor. Beginnend mit einer Vorwärtstransformation eines senkrecht von oben auf den Pyramidenspiegel auftreffenden Laserstrahls werden die Auftreffpunkte auf den PSD-Sensoren berechnet. Zusammen mit bekannten Positionen der PSD-Koordinatensysteme, die rotationssymmetrisch im Radius R_{PSD} um den Globalkoordinatenursprung angeordnet sind, können die Schnittpunkte der Laserstrahlen mit den PSD-Sensoren in den nativen PSD-Koordinatensystemen berechnet werden. Mithilfe eines inversen Algorithmus, der mittels eines numerischen Verfahrens nach Newton gelöst werden kann, bestimmen PARK ET AL. (1999) dann aus den PSD-Daten die Objektposition.

3 Defizite herkömmlicher Positionierkonzepte, Handlungsbedarf und Zielsetzung

3.1 Überblick

Dieses Kapitel skizziert die Herausforderungen bei der Montage MOEMS-basierter Produkte und diskutiert, wie diese durch existierende Sensorsysteme adressiert werden. Darauf aufbauend werden die Nachteile existierender Positionierungsstrategien zusammengefasst und daraus ein Handlungsbedarf für die Forschung und Entwicklung im Bereich der Positionssensorik abgeleitet. Dem Handlungsbedarf entsprechend wird abschließend die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit formuliert.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt, sind moderne mikro-optoelektromechanische Systeme bzw. MOEMS-basierte Produkte meist hybrid aus optischen Elementen wie Mikroschwingspiegeln, Linsen, Dioden und Mikrolasern aufgebaut. Die Montage dieser Systeme unterliegt einigen Randbedingungen, die Herausforderungen bei der Bauteilpositionierung mit sich bringen. In den Systemen eingebaute optische Funktionskomponenten müssen in der Regel mit einer Genauigkeit von unter $5\ \mu\text{m}$ positioniert und unter $0,1^\circ$ orientiert werden (EBERHARDT ET AL. 1999). Da bei der Montage alle Toleranzen vorhergehender Prozesse zusammenlaufen, müssen relevante Funktionsflächen dabei direkt detektiert werden (LOTTER ET AL. 2006). Eine indirekte Positionierung über größere, leichter zu erfassende Trägerkomponenten oder Rahmenstrukturen reicht nicht aus. Im Folgenden werden insbesondere die von existierenden Sensorsystemen noch unzureichend beherrschten Aspekte der Montage hybrider optischer Mikrosysteme beleuchtet.

3.2 Herausforderungen bei der Montage MOEMS-basierter Systeme

3.2.1 Positionierung in sechs räumlichen Freiheitsgraden

Eine zentrale Eigenschaft optischer Mikrosysteme ist deren Fähigkeit, Licht in jeder Raumrichtung beeinflussen oder erfassen zu können. Diese Funktionalität kann nur erreicht werden, wenn strahlführende und/oder -formende Komponenten in allen sechs räumlichen Freiheitsgraden genau ausgerichtet sind. Werden in einem laserbasierten MOEMS Mikrospiegel oder Mikrolinsen verbaut, so bestimmt sowohl der Einfallswinkel als auch der Auftreffpunkt des Lasers maßgeblich die Funktionalität

3 Defizite herkömmlicher Konzepte, Handlungsbedarf und Zielsetzung

und die Qualität des Systems. Der in Bild 2-3 dargestellte Mikrolaser des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik zeigt beispielhaft die Bedeutung der Justage optischer Mikrokomponenten für das Gesamtsystem. Die Position und Orientierung der im System montierten Mikrolinsen in allen räumlichen Freiheitsgraden bestimmt die Strahlqualität, die Fokusslänge sowie den Strahlaustrittswinkel des Lasers.

Im Gegensatz zu MEMS oder Systemen aus der AVT reichen bei der Montage optischer Mikrokomponenten reine Pick-and-Place-Operationen zur Bauteilpositionierung und -orientierung nicht aus. Sensorsysteme, die bei der Montage von MOEMS zum Einsatz kommen, müssen in der Lage sein, die Position und Orientierung optischer Mikrobauteile in allen sechs räumlichen Freiheitsgraden zu erfassen.

3.2.2 Eingeschränkte optische und taktile Zugänglichkeit

Eine weitere Herausforderung bei der Montage von MOEMS ist, dass mit steigender Integrationsdichte der Produkte die Zugänglichkeit der zu positionierenden Komponenten sinkt. Je höher die Integrationsdichte eines Systems ist, desto mehr Komponenten müssen pro Volumen montiert werden. Dabei wird die messtechnische Erfassung funktionsrelevanter Strukturen immer schwieriger (HAINZL ET AL. 2001). Dies wird besonders dann zum Problem, wenn die Komponenten so in ein Gesamtsystem montiert werden müssen, dass sich ihre optischen Funktionsbausteine bzw. -flächen gegenseitig verdecken und/oder optisch abschatten. Bild 3-1 zeigt das Modell eines Spiegel-basierten Mikrolaserprojektors des Fraunhofer-Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM).

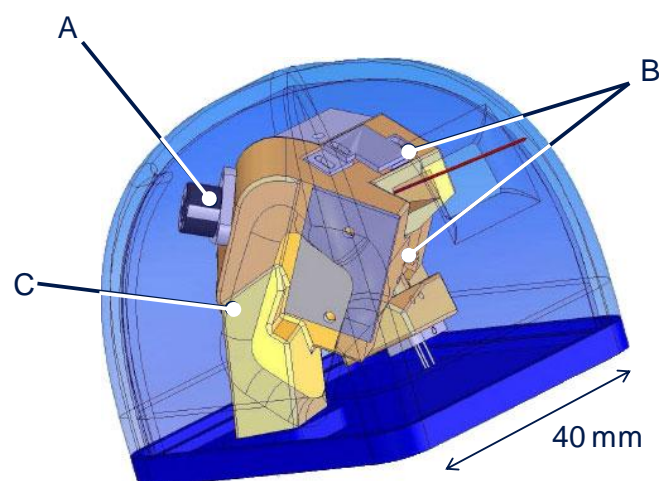


Bild 3-1: CAD-Modell eines Mikroprojektors (Fraunhofer IZM)

In diesem Projektor wird ein Mikrolaser (A) über zwei einachsige kippende und oszillierende Mikrospiegel (B) so ausgerichtet, dass ein Projektionsbild entsteht. Die in

3.2 Herausforderungen bei der Montage MOEMS-basierter Systeme

das System eingebauten Mikrospiegel (B) zeigen in das Innere der Trägerstruktur (C). In Bild 3-1 sind deshalb lediglich die Rückseiten der Trägerplatten der Spiegel zu erkennen. Für die Funktion des Projektors entscheidend sind aber die Positionen der Spiegelflächen und -drehachsen. Diese werden bei der Montage des Systems durch die Trägerstruktur (C) und die gegenüberliegenden, bereits montierten Komponenten verdeckt. Eine hochgenaue Positionierung des Spiegels relativ zum einfallenden Laserstrahl ist somit äußerst schwierig.

3.2.3 Detektion fügeferner Positionsreferenzen

Bedingt durch die funktionsorientierte Auslegung von MOEMS orientiert sich deren Aufbau an den Eigenschaften des für die Systemaufgabe relevanten Lichts. Dies führt dazu, dass optische Mikrokomponenten oft auf Laserlichtquellen oder Lichteinkopplungspunkte referenziert werden müssen. Die Positionierung bei Montageoperationen ist dann nicht durch die relative Ausrichtung der Fügepartner bestimmt, sondern durch eine optische Referenz fern der Fügestelle (im Folgenden *fügeferne Referenz* genannt). Abhängig von den Systemeigenschaften reicht eine hochgenaue Positionierung der Fügepartner zueinander oft nicht aus, um die optische Funktionalität des Gesamtsystems zu gewährleisten. Erschwerend kommt hinzu, dass die optische Referenz zum Zeitpunkt der Montage unter Umständen nicht verfügbar ist. Das folgende Bild eines Halbschnittmodells eines Scanners für Laservibrometer (Bild 3-2) verdeutlicht sehr gut die fügeferne, optische Bauteilreferenzierung.

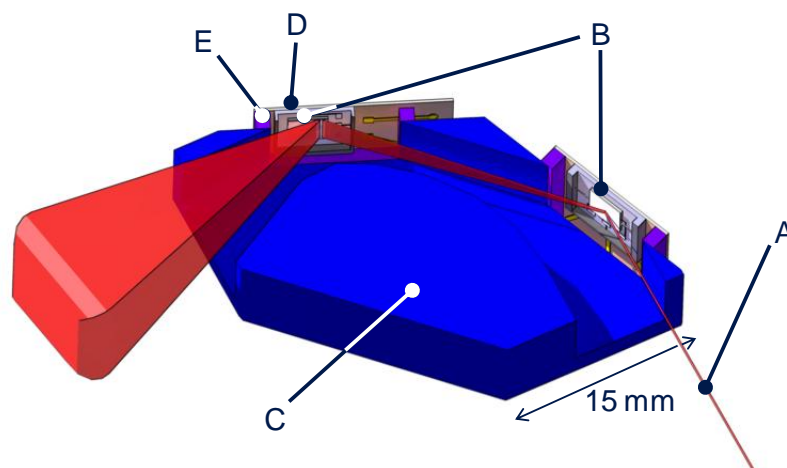


Bild 3-2: Modell eines Scanners für Laservibrometer im Halbschnitt

Der Scanner steuert einen in das System eingekoppelten Laserstrahl (A) durch zwei einachsige drehbare Mikrospiegel (B) so, dass dieser zur laservibrometrischen Erfassung mehrerer Messpunkte über eine Oberfläche gerastert werden kann. Bei der Montage des Systems werden die Mikrospiegel (B) zusammen mit einem Rah-

3 Defizite herkömmlicher Konzepte, Handlungsbedarf und Zielsetzung

men (E) und einer Platine mit Steuerelektronik (D) vormontiert. Diese Baugruppe wird dann in die Trägerstruktur (C) geklebt. Bei diesem Fügeprozess müssen die Spiegel relativ zum Laserstrahl und relativ zueinander ausgerichtet werden. Eine Positionierung anhand der Trägerstruktur reicht aufgrund der Fertigungs- und Montagegenauigkeiten der Teilkomponenten nicht aus.

3.3 Nachteile existierender Sensorsysteme

Der Bewertung existierender Sensorsysteme zur Bauteilpositionierung hinsichtlich der im vorangegangenen Abschnitt skizzierten Herausforderungen bei der Montage MOEMS-basierter Produkte zeigt, dass vorhandene Technologien diese Kernprobleme unzureichend oder nur einzeln adressieren. Tabelle 3-1 zeigt eine Gegenüberstellung von Positionierkonzepten entsprechend dem Stand der Technik.

Detektion fugeferne Positionsreferenz					
Problem der optischen und taktilen Zugänglichkeit					
Hochpräzise Positionierung in 6 räumlichen Freiheitsgraden					
Standard- technologien	Absolutpositionierung	●	●	○	
	Bildverarbeitende Sensoren	einfache Bildverarbeitung	○	○	○
		Photogrammetrie	●	○	○
	Lasersensoren	Triangulation	○	○	○
		Interferometrie	○	●	○
Taktile Sensoren		●	○	○	
Sensorübergreifende Methoden zur Relativpositionierung	Eigenausrichtung	passiv	●	●	○
		aktiv	●	●	○
	Falt- und Klapptechniken		●	●	○
	On-the-machine-assembly		○	○	○
	Preadjusted assembly magazines		○	○	●
	Stereophotogrammetrie		●	○	○
	Infrarot-Durchlicht		○	●	○
	Lagebestimmung auf CAD Basis		●	○	○
	Diametrale Bildüberlagerung		○	●	○
	Dreistrahlinterferometer		●	○	○
Dezidierte Markerreflexion		●	●	○	

○ nicht möglich ◐ theoretisch denkbar ◑ teilweise möglich ● möglich
● vorgesehen

Tabelle 3-1: Bewertung existierende Sensorsysteme zur Bauteilpositionierung

Mittels *Triangulation* oder *Interferometrie* lässt sich eine translatorische Punktmessung an einem Bauteil durchführen. Diese reicht aus, um beispielsweise die z-Position eines Bauteils zu bestimmen, sie bietet jedoch nicht die Möglichkeit, ein Bauteil in allen sechs räumlichen Freiheitsgraden zu justieren. Auch die *einfache Bildverarbeitung* deckt lediglich drei räumliche Freiheitsgrade ab. Dies sind in der

Regel die x- und y-Position sowie die rotatorische Orientierung um die z-Achse (γ). Dagegen ermöglicht die Photogrammetrie zumindest eine partielle Erfassung von Bauteilkonturen in sechs räumlichen Freiheitsgraden. Durch die Streifenprojektion können beispielsweise Konturinformationen entlang einer Laserlinie extrahiert werden (OECHSNER ET AL. 2004; DRIESSEN 2008). Die Datenverarbeitung erlaubt so in Kombination mit detaillierten Geometrieinformationen über ein Bauteil die eindeutige Bestimmung dessen räumlicher Position. Eine taktile Bauteilabtastung kann die Lage bestimmter Messpunkte in allen translatorischen Freiheitsgraden erfassen. Sind deren Positionen auf dem Bauteil bekannt, kann auf die Bauteilorientierung zurück gerechnet werden (vgl. Abschnitt 2.2.5). Mithilfe unterstützender, nachgelagerter Datenverarbeitungsschritte ist eine Positionierung in sechs räumlichen Freiheitsgraden sowohl durch die Photogrammetrie als auch durch die taktile Messung möglich. Die eingeschränkte optische und taktile Zugänglichkeit sowie der Positionierung bezüglich fügeferner Positionsreferenzen werden durch diese Technologien jedoch nicht beherrscht.

Die *Absolutpositionierung* ist unter den Standardtechnologien am besten für die Montage MOEMS-basierter Produkte geeignet. Mit ihr können Bauteile innerhalb eines Globalkoordinatensystems theoretisch hochgenau in sechs räumlichen Freiheitsgraden positioniert werden. Da die Montageobjekte nicht direkt sensortechnisch erfasst werden, spielt auch eine schlechte Zugänglichkeit funktionsrelevanter Strukturen keine Rolle. Allerdings sind Systeme in einem für die Mikromontage geeigneten Genauigkeitsbereich aus strukturdynamischen Gründen meist nur für eine Positionierung in vier Freiheitsgraden ausgelegt (vgl. Abschnitt 2.2.3 und Abschnitt 2.2.5). Auch die Justage optischer Komponenten relativ zueinander ist nur indirekt durch den Vergleich ihrer theoretischen Positionen über das Globalkoordinatensystem möglich. Die Messung der tatsächlichen Bauteilpositionen erfolgt nicht. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass, abgesehen von der Absolutpositionierung und der Photogrammetrie, *Standardtechnologien die Anforderungen zur Bauteilpositionierung bei der Montage optischer Mikrokomponenten nicht erfüllen.*

Sensorübergreifende Methoden zur Relativpositionierung gehen über die Möglichkeiten der Standardtechnologien hinaus. Die Strategie der *Eigenausrichtung*, passiv sowie aktiv, ermöglicht eine Montage in sechs räumlichen Freiheitsgraden ungeachtet der sinkenden Zugänglichkeit bei steigender Integrationsdichte. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass weder eine sensortechnische Erfassung der Funktionsflächen noch eine Bewegung der Komponenten durch externe Handhabungsgeräte erfolgt. Allerdings ist eine Positionierung relativ zu fügefernen Referenzkomponenten nicht möglich. Außerdem kann das Prinzip der Eigenausrichtung nur bei speziell

3 Defizite herkömmlicher Konzepte, Handlungsbedarf und Zielsetzung

dafür geeigneten Komponenten eingesetzt werden. Dasselbe gilt für *Falt- und Klapptechniken*.

Laserbasierte Methoden zur dreidimensionalen Lageerkennung sind die *dezidierte Markerreflexion* und die *Dreistrahlinterferometrie*. Erstere erfordert eine Vorpositionierung des Bauteils, sodass der eingesetzte Messlaserstrahl auf den Bauteilmarker trifft. Solange die Strahlengänge von Messlaser und Laserreflexionen nicht verdeckt werden, toleriert die Messmethode eine schlechte optische und taktile Zugänglichkeit der Bauteile. Ähnliches gilt für die Dreistrahlinterferometrie. Solange eine bekannte Fläche des Bauteils für die Laserstrahlen und deren Reflexionen zugänglich bleibt, kann die Bauteillage erkannt werden. Fügeferne Positionsreferenzen können von beiden Lasersensoren nicht erfasst werden.

Das Montageprinzip des „*On-the-machine-assembly*“ erreicht durch die Verwendung von Bauteilen als Werkzeug sehr geringe Toleranzen in den Fügezonen zwischen den zu montierenden Komponenten. Dies führt zu einer sehr hohen Genauigkeit der Relativpositionen von Bauteilen über Toleranzketten hinweg. Bei kurzen Toleranzketten kann so ein Bauteil bezüglich einer fügefernen Referenz positioniert werden. Durch das Risiko der Prozessgasentstehung und der thermischen Einflusszone der Umformprozesse, die optische Komponenten beschädigen oder erblinden lassen könnten, ist das Verfahren nur bedingt für die Montage MOEMS-basierter Produkte geeignet. „*On-the-machine-assembly*“ wird vor allem bei der AVT und der 2,5-D-Montage mikromechanischer Komponenten eingesetzt (LANGEN ET AL. 1995; MASUZAWA ET AL. 1997).

Die *Lagebestimmung auf CAD-Basis* kann mithilfe zweidimensionaler Bilder die relative Position und Orientierung zweier Objekte zueinander in allen drei Dimensionen erfassen. Dafür wird das Realbild mit CAD-Modellen der Objekte überlagert. Allerdings ist die Erfassung aller wesentlichen Bauteilmerkmale in einer Realbildaufnahme vorausgesetzt, die Zugänglichkeit der Objekte darf deshalb nicht eingeschränkt sein. Auch die *Stereophotogrammetrie* ermöglicht eine Positionsbestimmung der Bauteillage in sechs räumlichen Freiheitsgraden (vgl. Abschnitt 2.3.6). Allerdings ist der verwertbare Bildausschnitt in der Mikromontage aufgrund der geringen Tiefenschärfe der heute verfügbaren Kameraobjektive klein. Bauteile lassen sich deshalb meist nur an ihren unmittelbaren Fügepartnern ausrichten. In Einzelfällen, in denen Montageobjekt und fügeferne Referenzstruktur in einem Stereobild liegen, ist eine dreidimensionale Positionsbestimmung relativ zu fügefernen Objekten möglich. Wichtige Bauteilstrukturen müssen mindestens in einem der aufgenommenen Bilder zu erkennen sein. Eine Bauteilabschattung wirkt sich negativ auf die Genauigkeit der Bildauswertung aus.

Ein weiteres optisches Sensorprinzip basiert auf der *Durchleuchtung des Montageobjekts mit Infrarotlicht*. Funktionsrelevante Strukturen in schlecht erfassbaren Bereichen zu montierender Komponenten können so sichtbar gemacht werden. Die eingeschränkte Bauteilzugänglichkeit wird – zumindest für Systeme aus IR-transparenten Werkstoffen – gelöst. Gegenüberliegende Bauteile können durch deren Konturüberlagerung bei der Durchlichtprojektion zueinander ausgerichtet werden. Liegen die zu positionierenden Subsysteme aber nicht im selben Bildraum in verschiedenen Ebenen, ist eine Positionierung bezüglich fügeferner Referenzelemente nicht möglich. Da bei der Durchleuchtung nur zweidimensionale Konturen sichtbar werden, können Bauteilpositionen nur in drei räumlichen Freiheitsgraden erfasst werden.

Auch die *diametrale Bildüberlagerung* adressiert speziell das Problem der Objektverdeckung. Eine Optik zwischen den Fügepartnern ermöglicht die relative Ausrichtung von verdeckten Strukturen auf deren Unterseite. Allerdings können nur direkte Fügepartner zueinander positioniert werden. Aufgrund der Überlagerung von zweidimensionalen Bildern lassen sich Bauteilpositionen mit dieser Technik ebenfalls nur in drei räumlichen Freiheitsgraden bestimmen.

Durch „*Preadjusted assembly magazines*“ können Komponenten hochgenau flächig zueinander ausgerichtet werden ohne direkt miteinander in Kontakt zu stehen (vgl. Abschnitt 2.3.5). Eine Positionierung in sechs räumlichen Freiheitsgraden und eine Montage bei beengten räumlichen Randbedingungen ist prinzipbedingt nicht möglich.

3.4 Handlungsbedarf

In vielen mikro-opto-elektromechanischen Systemen kommen Mikroschwingespiegel, Mikrolinsen, Dioden und Mikrolaser zum Einsatz (NAJAFI 2003; SMITH 2003; ZARSCHIZKY ET AL. 2003). Da MOEMS und MOEMS-basierte Produkte meist hybrid aufgebaut sind, ist für deren Produktion eine Montage notwendig (BARGIEL ET AL. 2010). Dabei ist insbesondere die hochgenaue Positionierung der optischen Funktionselemente relativ zueinander oder bezogen auf Referenzelemente wichtig. Letztere werden, falls sie Teil des Systems sind, als eine der ersten Komponenten montiert. Bedingt durch die zu diesem Zeitpunkt noch geringe Anzahl montierter Komponenten ist die Zugänglichkeit hoch. Auch eine Positionierung bezüglich fügeferner Objekte ist bei der Montage von Referenzobjekten nicht erforderlich. Bei strahlführenden oder -formenden Systemen ist die Positionsreferenz in der Regel der Lichtstrahl bzw. die Strahlquelle. Für die Positionierung von Mikrola-

3 Defizite herkömmlicher Konzepte, Handlungsbedarf und Zielsetzung

sen und Dioden reichen daher Sensorsysteme aus, die eine Lagebestimmung in sechs räumlichen Freiheitsgraden relativ zu den direkten Fügepartnern ermöglichen.

Bei der Montage nicht referenzbildender, optischer Mikrokomponenten – wie Mikrospiegel oder Mikrolinsen – gelten diese Voraussetzungen jedoch nicht. Hier kommt es zu drei Kernproblemen, die durch herkömmliche Sensorsysteme nicht oder nur unvollständig beherrscht werden. Diese sind erstens die Positionierung in sechs räumlichen Freiheitsgraden, zweitens die eingeschränkte optische und taktile Zugänglichkeit und drittens die Detektion fügeferner Positionsreferenzen (vgl. Abschnitt 3.2 und 3.3). Für die Montage von Mikrolinsen zeigen MIESNER ET AL. (2009), dass eine Linsenjustage in sechs räumlichen Freiheitsgraden relativ zu einer Laser- oder Lichtquelle durch eine Auswertung des optischen Nah- und Fernfeldes bei eingeschaltetem Laser durchgeführt werden kann. Zur abschließenden Positionskontrolle wird außerdem die maximale optische Ausgangsleistung des Gesamtsystems gemessen. Diese ist, bei geringen Abweichungen der Diodenleistung, abhängig von der Genauigkeit der Linsenausrichtung. Da das Messsystem am Strahlaustrittspunkt des Lasers misst, wird auch das Problem der eingeschränkten Zugänglichkeit adressiert. Systembedingt muss der Strahlengang des Mikrolasers frei sein. Die Zugänglichkeit an diesem Punkt ist somit immer gewährleistet.

Im Gegensatz dazu wird *die hochgenaue Positionsbestimmung von Mikrospiegeln während der Montage weder von industriell verfügbaren Sensorsystemen noch von Forschungsprototypen abgedeckt. Hier stellt speziell die Positionierung von Dreh- und Kippspiegeln, oszillierend sowie quasi-statisch, eine Herausforderung dar.* Anders als statische Reflektoren, die lediglich in der korrekten Ebene liegen und damit nur in drei räumlichen Freiheitsgraden eindeutig definiert sein müssen, ist bei beweglichen Systemen die genaue Lage der Drehachse wichtig. Ein Mikroschwingespiegel muss deshalb in sechs räumlichen Freiheitsgraden hochgenau positioniert werden. Eine Fehlstellung des Spiegels entlang der Drehachse hat keine Auswirkung auf das Reflexionsergebnis des Systems. In diesem Freiheitsgrad reicht daher eine geringere Positioniergenauigkeit aus.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die hochgenaue Positionierung optischer Mikrokomponenten eine Schlüsselrolle bei der Produktion hybrider MOEMS- und MOEMS-basierter Produkte spielt. Besonders wichtig ist die sensorische Erfassung der Relativpositionen optisch interagierender Elemente. Betrachtet man die in MOEMS verbauten Standardkomponenten, fehlen besonders für Mikrospiegel und Mikroschwingespiegel geeignete Sensorsysteme und Positionierungsstrategien, die alle Anforderungen der Montage optischer Mikrosystemkomponenten erfüllen. *Eine Positionierung dreh- und kipparer Mikrospiegel in sechs räumlichen Freiheitsgraden bezüglich fügeferner Positionsreferenzen bei mangeln-*

der optischer und taktiler Zugänglichkeit ist derzeit nicht möglich. Gleichzeitig finden solche beweglichen Spiegel zunehmend Anwendung in optischen Mikrosystemen (KIANG ET AL. 1996; XIE ET AL. 2003; CHU ET AL. 2010). Deshalb besteht ein klarer Bedarf an Sensorsystemen, die für die Montage von Mikrospiegeln und Mikrokippspiegeln geeignet sind.

3.5 Zielsetzung der Arbeit

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit leitet sich aus dem im vorangegangenen Abschnitt identifizierten Handlungsbedarf ab. *Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines berührungslosen Sensorprinzips und einer Methode zur hochgenauen Bauteilpositionierung von Mikroschwing- und Mikrokippspiegeln bei der Montage MOEMS-basierter Systeme.*

Aufbauend auf dem Stand der Technik und den bereits skizzierten Anforderungen an die Montage MOEMS-basierter Produkte wird ein Sensorprinzip für die Positionierung von Mikrokippspiegeln theoretisch entwickelt und vorgestellt. Wesentlich sind die allgemeine Darstellung des Prinzips, die mathematische Modellierung und Simulation aller physikalischen Zusammenhänge und darauf aufbauend die Entwicklung von Lösungsalgorithmen für die Berechnung der Objektposition basierend auf den erfassten Sensordaten. Durch diese theoretischen Betrachtungen kann die Allgemeingültigkeit der Methode hinter dem Sensorprinzip gezeigt und deren Übertragbarkeit auf mehrere Anwendungsfälle gewährleistet werden.

Abschließend werden Methode und Simulation in einem Versuch validiert. Der Aufbau dieses Versuchs orientiert an der Montage eines Mikrosanners und den dabei durchgeführten Positioniervorgängen und zeigt so die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis.

Bei dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Sensorprinzip handelt es sich um ein berührungsloses, lasergestütztes System, das auf Basis eines Projektionsmusters Bauteilpositionen berechnet. In Kapitel vier werden deshalb die für das Verständnis der Positionierungsmethode und den späteren Versuchsaufbau relevanten Grundlagen der Lasermesstechnik vorgestellt. Das darauf folgende Kapitel fünf gibt einen Überblick über die mathematischen Grundlagen für die später entwickelten Algorithmen zur Musterauswertung und Positionsberechnung.

4 Relevante Grundlagen der Lasermesstechnik

4.1 Ausbreitung und Charakterisierung von Laserstrahlen

4.1.1 Strahlpropagation und Intensitätsverteilung

Das elektromagnetische Feld und die Intensitätsverteilung eines Laserstrahls lassen sich durch die so genannten transversale elektromagnetischen Moden oder TE-Moden (TEM) beschreiben. Die TE-Moden werden durch zwei Indizes unterschieden, die angeben wie viele Nullstellen das elektrische Feld über den Strahlquerschnitt aufweist. Die meisten Gaslaser und viele Festkörperlaser niedriger Leistung (z.B. HeNe- und Ionenlaser) emittieren Strahlung der TEM₀₀. Hochleistungslaser, speziell Materialbearbeitungslaser, emittieren dagegen höhere Strahlungsmoden. In der Messtechnik kommen ausschließlich Laser niedriger Leistung zum Einsatz (DONGES 2007). Ein Grund dafür ist die geringe eingebrachte Energie. Höher energetische Laser können empfindliche Sensoren oder Messobjekte beschädigen. Ein Vorteil von TEM₀₀-Lasern liegt in der guten Fokussierbarkeit bei gleichzeitig geringer Fernfelddivergenz. Diese Eigenschaften ermöglichen je nach Anwendung sehr präzise Messungen.

Nach HÜGEL ET AL. (2009) gilt für die rein Gauß-förmige Amplitudenverteilung $E_{00}(x, y, z, t)$ einer idealen TEM₀₀-Strahlung der Zusammenhang

$$|E_{00}(x, y, z, t)| = \sqrt{\frac{w_{x,o}}{w_x(z)}} e^{\left(-\frac{x^2}{w_x^2(z)}\right)} \sqrt{\frac{w_{y,o}}{w_y(z)}} e^{\left(-\frac{y^2}{w_y^2(z)}\right)}. \quad (4.1)$$

Die Strahlradien w in x - und y -Richtung normal zur Ausbreitungsrichtung z des Strahls lassen sich durch

$$w_x^2(z) = w_{x,0}^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_{R,x}^2}\right) \quad (4.2)$$

$$w_y^2(z) = w_{y,0}^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_{R,y}^2}\right) \quad (4.3)$$

berechnen. Die Terme z_R bezeichnen dabei die Rayleigh-Längen. Sie definieren den Abstand zur Strahltaile, in dem sich die Strahlquerschnittsfläche verdoppelt. Für die laterale Strahlausbreitung an dieser Stelle gilt: $w(z_R) = \sqrt{2}w_0$. Die Rayleigh-Längen sind definiert durch

$$z_{R,x} = \frac{\pi w_{x,0}^2}{\lambda}; \quad z_{R,y} = \frac{\pi w_{y,0}^2}{\lambda}, \quad (4.4)$$

4 Relevante Grundlagen der Lasermesstechnik

wobei $w_{x,0}$ und $w_{y,0}$ den Werten von $w_x(z)$ und $w_y(z)$ in der Strahltaile entsprechen. Daraus ergibt sich bei bekannter Rayleigh-Länge und einem runden Strahlquerschnitt für w_0

$$w_0 = \sqrt{\frac{z_R}{\pi}} \lambda. \quad (4.5)$$

Für Strahlquellen mit runden Strahlquerschnitten gilt $w_{x,0} = w_{y,0} = w_0$ sowie $z_{R,x} = z_{R,y} = z_R$ und damit $w_x(z) = w_y(z) = w(z)$. Aus (4.2) bis (4.4) folgt damit für den Strahlradius w der Zusammenhang

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}. \quad (4.6)$$

Im Fall eines TEM₀₀-Lasers mit Kreisquerschnitt entspricht die transversale Ausdehnung $w(z)$ dem Abstand radial zur Ausbreitungsrichtung (z), bei dem die Intensität des Strahls auf $1/e^2$ der Maximalintensität abfällt. Ist die maximal auftretende Strahlungsintensität I_0 bekannt, kann die Intensität in Abhängigkeit des Strahlradius mit der folgenden Formel berechnet werden (DONGES 2007):

$$I(r) = I_0 e^{\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right)}. \quad (4.7)$$

Bis zur Rayleigh-Länge z_R verhält sich der Laserstrahl in axialer Richtung näherungsweise wie ein paralleles Strahlenbündel. Oberhalb der Rayleigh-Länge öffnet sich der Strahl mit dem Winkel θ_{SD} (Bild 4-1). Dieser ist durch die Asymptoten der Hyperbelfunktion (4.6) definiert und kann durch den folgenden Zusammenhang beschrieben werden

$$\theta_{SD} = \arctan\left(\frac{w_0}{z_R}\right). \quad (4.8)$$

Der Strahlöffnungswinkel θ_{SD} wird auch als Feinfelddivergenz eines Lasers bezeichnet. Die Divergenz ist indirekt proportional zur Strahltaile. Die beiden Parameter können deshalb nur in Abhängigkeit voneinander optimiert werden (DONGES 2007). Bild 4-1 zeigt eine vereinfachte Skizze eines Laserstrahls mit rundem Querschnitt im Bereich der Strahltaile und dessen qualitative Intensitätsverteilung.

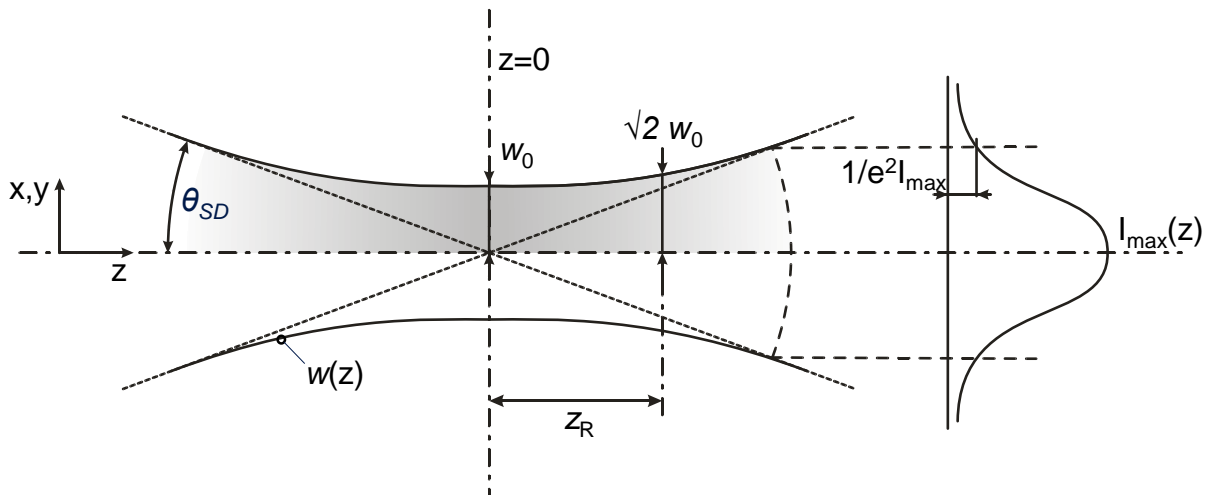


Bild 4-1: Querschnitt und Intensitätsverteilung eines TEM_{00} -Lasers mit Kreisquerschnitt im Bereich der Strahltaile in Anlehnung an HÜGEL & GRAF (2009)

Intensitätsverteilung $I(z, w, r)$, Strahltaillendurchmesser w_0 , Divergenz θ_{SD} und Transversalausdehnung $w(z)$ sind wichtige Größen bei der Auswahl der Sensortechnik zur Erfassung von Laserstrahlung. Die von einem Laser auf einer Sensorfläche erzeugte Kontur und deren Ausprägung in Sensordaten hängen maßgeblich von diesen Parametern ab.

4.1.2 Fokussierung

Für viele Sensoranwendungen ist es wichtig, den Laserstrahl auf einen möglichst gleichmäßigen Strahldurchmesser zu begrenzen. Für präzise Messungen sollte der Taillendurchmesser $d_f = 2w_0$ möglichst klein sein. Gleichzeitig wird für einen großen Messbereich ein langer fokaler Bereich z_R benötigt. Obwohl ein TEM_{00} -Laser eine sehr geringe Strahltaile aufweist, führt seine natürliche Divergenz zu einer Aufweitung des Strahls proportional zur Lauflänge. In der Praxis ist es deshalb notwendig, den Strahl auf das Messobjekt oder den Sensor zu fokussieren oder den Strahlquerschnitt durch eine entsprechende Apertur einzustellen. Abhängig von Divergenz und Strahltaillendurchmesser lässt sich ein Laser durch das Strahlparameterprodukt (SPP) charakterisieren (ISO 11146-3 2004).

$$\frac{d_f \theta_{SD}}{2} \triangleq SPP \quad (4.9)$$

Das Strahlparameterprodukt ist ein Indikator für die Fokussierbarkeit eines Lasers. Je geringer der Wert des SPP, desto besser lässt sich ein Laserstrahl fokussieren. Von allen TEM_{nm} -Strahlen hat der TEM_{00} - bzw. Gauß-Strahl sowohl die kleinste transversale Ausdehnung als auch die kleinste Divergenz. Das SPP eines TEM_{00} -Lasers liegt näherungsweise bei $\frac{\lambda}{\pi}$ (HÜGEL ET AL. 2009).

4 Relevante Grundlagen der Lasermesstechnik

Ein Laser emittiert kohärentes Licht in nahezu parallelen Strahlenbündeln. Trifft ein Laserstrahl auf eine kleine Öffnung, wie zum Beispiel eine Blende, bilden sich hinter dieser Öffnung charakteristische Interferenzmuster aus, die eine sensortechnische Erfassung des Strahlmittelpunkts erschweren oder verfälschen können. Eine Blende zur Verringerung des Strahlquerschnitts ist deshalb für viele sensortechnische Anwendungen ungeeignet. Zur Fokussierung eines Laserstrahls, also zur Einstellung der Strahltaile sowie Positionierung des fokalen Bereichs, werden daher Linsen verwendet. Fällt ein Laserstrahl lotrecht auf eine Linse mit der Brennweite f bildet sich die in Bild 4-2 schematisch dargestellte Strahlform aus.

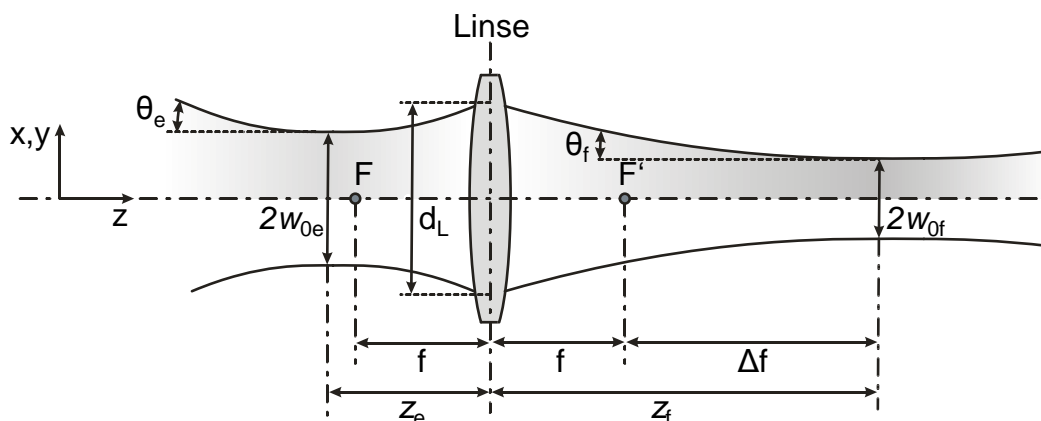


Bild 4-2: Strahlformung eines Lasers bei Fokussierung mittels einer Linse in Anlehnung an DONGES (2007)

Die Strahltaile $d_{0e}=2w_{0e}$ des einfallenden Strahls ist dabei durch Gleichung (4.6) bestimmt und liegt im Abstand z_e zur Linse. Anders als in der geometrischen Optik angenommen, ist der Abstand des fokussierten Strahls von der Linse z_f nicht nur von der Brennweite f und der Gegenstandsweite z_e abhängig, sondern auch von der Rayleigh-Länge $z_{R,e}$ des Laserstrahls (HÜGEL ET AL. 2009). Es gilt der folgende Zusammenhang:

$$z_f = -f - \Delta f = -f - \frac{(z_e - f)f^2}{(f - z_e)^2 + z_{R,e}^2} \quad (4.10)$$

Bei vielen Sensoranwendungen ist ein möglichst konstanter Strahldurchmesser erwünscht (vgl. Abschnitt 2.2.5.3). Vorausgesetzt die Strahlqualität des Eingangslasers ist hoch genug, kann durch eine geeignete Fokussieroptik die Strahldivergenz reduziert werden. Ausschlaggebend für eine hohe Strahlqualität ist ein niedriges Strahlparameterprodukt. Die Strahltaile des fokussierten Strahls d_{0f} berechnet sich aus der Taille des Eingangslasers und deren Abstand zur Linse.

$$d_{0f} = 2w_{0f} = \frac{2w_{0e}}{\sqrt{(f - z_e)^2 + z_{R,e}^2}} \quad (4.11)$$

Für die Divergenz des fokussierten Strahls gilt:

$$\theta_{SDf} \approx \frac{d_L}{f} \quad (4.12)$$

Der Laserdurchmesser beim Linsendurchgang d_L ist dabei definiert als

$$d_L = \frac{2w_{0e}}{z_{R,e}} \sqrt{z_{R,e}^2 + z_e^2} \quad (4.13)$$

Aus (4.11) bis (4.13) ist ersichtlich, dass eine starke Strahlfokussierung eine große Divergenz bewirkt. Dies ist gleichbedeutend mit einer geringen Tiefenschärfe und einer starken Aufweitung des Strahls außerhalb der Fokuszone. Für den Einsatz in Sensoren, die über eine verhältnismäßig große freie Lauflänge des Laserstrahls messen, eignen sich daher Linsen mit möglichst großer Fokusslänge f . Diese bewirken eine geringe Fokussierung und einen nahezu konstanten Strahldurchmesser, der nahe dem Linsendurchgangswert d_L liegt. Optiken mit einstellbarer Fokussierung, die weite Fokusslängen erreichen, ermöglichen darüber hinaus die Einstellung der Strahltaile auf den Bereich der Messung oder eine bewusste Defokussierung zur Stabilitätserhöhung der Messung (MÄKYNEN 2000).

Bei einer niedrigen Strahldivergenz kann die Lichtausbreitung des Lasers, sofern sie in einem optisch homogenen Medium wie Luft stattfindet, stark vereinfacht werden (MANDESTAM 1907). Beugungseffekte innerhalb eines Mediums ohne Strahlschränkung müssen dann nicht berücksichtigt werden und die Strahlpropagation des Lasers lässt sich unter Vernachlässigung seines Wellencharakters durch die Gesetze der geometrischen Optik beschreiben. Die Lichtausbreitung kann in diesem Fall auf drei Prinzipien reduziert werden, das Prinzip der Reflexion, der Brechung und der geradlinigen Ausdehnung. Lichtstrahlen breiten sich in homogenen Medien linear aus und werden durch optische Elemente abgelenkt. Deshalb können trigonometrische Modelle zur Berechnung der Strahlausbreitung und -ablenkung angewendet werden (HÜGEL ET AL. 2009).

4.2 Messtechnik zur Bestimmung der Position des Brennflecks

4.2.1 Charge-coupled Device

Zum Detektieren des Auftreffpunkts eines Lasers in der Ebene eignen sich unterschiedliche Systeme. Eines dieser Systeme ist der CCD-Sensor, der auch in Digitalkameras verwendet wird. CCD steht dabei für „Charge-coupled Device“ und beschreibt das Wirkprinzip beim Auslesen der Daten des Chips. Die meisten CCDs sind Metall-Isolator-Halbleiter-Strukturen, kurz MIS. Über einem dotierten Halbleiter liegt

4 Relevante Grundlagen der Lasermesstechnik

eine isolierende Schicht, auf der optisch transparente Elektroden angebracht sind. Diese sind so kontaktiert, dass sie sich von außen ansteuern lassen. Legt man an eine Elektrode eine Spannung an, nimmt die Konzentration der Majoritätsladungsträger direkt unterhalb der Isolierschicht stark ab. Es bildet sich ein so genannter Potentialtopf. In einem Ersatzschaltbild kann diese Struktur als eine Photodiode mit darunter liegendem Kondensator betrachtet werden. Trifft Licht auf die Sensoroberfläche entstehen durch den inneren photoelektrischen Effekt proportional zur Lichtintensität Elektronen-Loch-Paare im Halbleiter. Die dabei erzeugten zusätzlichen Minoritätsladungsträger – je nach Dotierung des Halbleiters sind dies Elektronen oder Elektronen-Löcher – sammeln sich im Potentialtopf. Die gleichzeitig erzeugten Majoritätsladungsträger fließen ins Innere des Halbleiters ab. Die photosensitive Schicht der MIS-Elemente reagiert nur auf Licht innerhalb eines bestimmten Wellenlängenbereichs. Die im Potentialtopf gespeicherte Ladung ist dadurch nicht nur abhängig von der Intensität des einfallenden Lichts sondern auch von dessen Wellenlänge (SZE ET AL. 2007).

Mehrere dieser photosensitiven MIS-Elemente sind in einem Sensor in Matrixanordnung rechteckig, quadratisch oder polygonal kombiniert (Bild 4-3). Sensoren zur Erkennung inkohärenten Lichts (z.B. Farbsensoren) kombinieren mehrere MIS-Elemente mit verschiedenen Wellenlängenspektren in einem Sensorpixel.

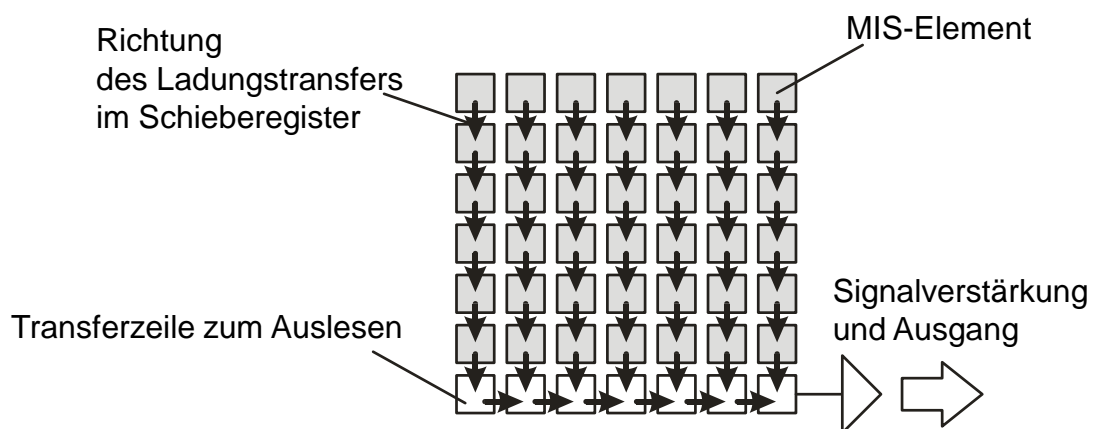


Bild 4-3: Aufbau und Ladungstransfer eines CCD-Sensors

Die nach einer Messung in den Potentialtöpfen der Elemente gespeicherten Ladungen werden ähnlich einem Schieberegister im Sensortakt ausgelesen: Zuerst werden die Ladungen an einer Seite der Matrix in eine Transferzeile übertragen. Anschließend werden die nicht an die Transferzeile angrenzenden Ladungen durch gezielte Ansteuerung der Elektroden in den Potentialtopf des der Transferzeile näheren Nachbarn verschoben. Nach dem gleichen Prinzip werden die Ladungen in der Transferzeile in Richtung Signalausgang verschoben und elementweise ausgegeben. Ist die Transferzeile komplett geleert, wird sie wieder aus der CCD-Matrix „befüllt“. So wird der gesamte Sensor Element für Element ausgelesen (THEUWISSEN 1997).

Da die Ladungen beim Auslesen in den photosensitiven MIS-Elementen zwischengespeichert werden, muss der Sensor während des kompletten Auslesevorgangs, beispielsweise durch eine mechanische Klappe, optisch abgeschirmt sein. Dies führt zu einer verhältnismäßig geringen Abtastfrequenz, mit der ein CCD-Chip neue Informationen senden kann. Ein weiterer Nachteil ist die Diskretisierung der Ortsinformationen. Die genaue Auflösung des Sensors hängt von Größe, Anordnung und Anzahl der MIS-Elemente ab. Der Vorteil eines CCD-Sensors ist, dass er flächige Gesamtaufnahmen erzeugt. So kann er nicht nur den Ort eines eintreffenden Laserstrahls bestimmen, sondern auch die Form des Auftreffpunkts und die Intensitätsverteilung messen.

4.2.2 Position-Sensitive-Detector

Ein weiterer Sensor, der sich zur Bestimmung der Koordinaten eines Laserpunkts auf einer Fläche eignet, ist ein bilateraler „Position-Sensitive-Detector“, kurz PSD. Dieser Sensor basiert auf einer oder zwei gekoppelten Lateraleffekt-Photodioden, die den Ort des Intensitätsmaximums des auftreffenden Lichts durch den entstehenden Photostrom bestimmen. Bild 4-4 zeigt schematisch den Aufbau einer einschichtigen Lateraleffekt-Diode in einem duolateralen PSD.

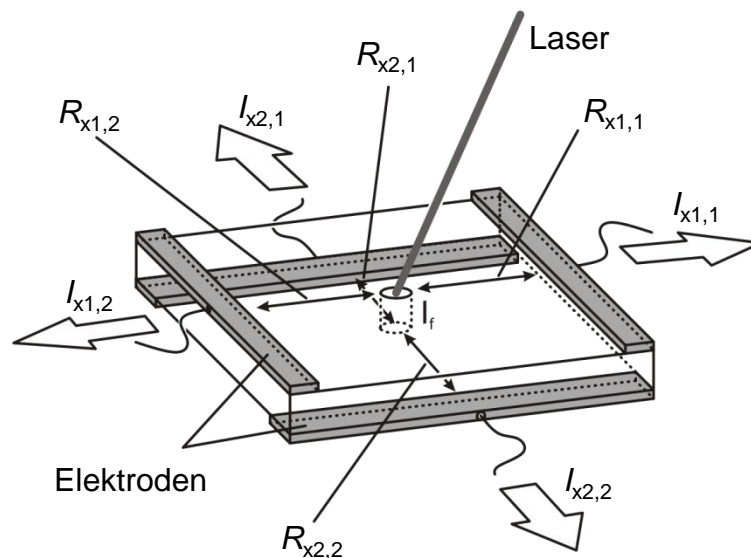


Bild 4-4: Funktionsprinzip eines duolateralen PSD

Trifft Licht auf das photosensitive Material der Diode, entsteht ein lokaler Photostrom. Die entstehenden freien Ladungsträger fließen am Dotierungsübergang des Materials, also an dessen Oberfläche, über die seitlich angeschlossenen Elektroden ab. Der dabei auftretende Widerstand ist abhängig von dem Abstand zwischen Entstehungspunkt des Photostroms und Elektrode. Durch eine separate Messung der Elektrodenströme kann so die Position des Intensitätsmaximums des auftreffenden Lichts bestimmt werden. Trifft ein Laser auf die ansonsten abgeschattete Sensorfläche ist die Lichtintensität am

Auftreffpunkt so hoch, dass das Messergebnis dem Ort des Strahlintensitätsmaximums entspricht. Um eine Überlagerung des Ergebnisses mit optischem Rauschen zu vermeiden sollte die Sensorfläche jedoch nicht direkt anderen Lichtquellen ausgesetzt sein. Zur Abschirmung reicht meist ein einfacher Eingangstunnel aus (BAUMANN 2006).

Im Unterschied zu einem CCD-Sensor macht ein PSD keine Komplettaufnahme der Sensorfläche. Mit ihm ist lediglich die Bestimmung des Orts des Intensitätsmaximums des einfallenden Lichts möglich. Im Unterschied zu dem CCD-Sensor liegt diese Information kontinuierlich vor. Das bedeutet, dass Ortsinformationen theoretisch unendlich genau ausgelesen werden können. In der Praxis hängt die Sensorgenauigkeit aber von der Auflösung des Messverstärkers und der Messgenauigkeit der auftretenden Elektrodenströme ab. Realaufösungen bis zu unter $1\ \mu\text{m}$ sind möglich (HÄUSLER ET AL. 1988). Weitere Grenzen sind durch das Messrauschen gesetzt, das durch Fremdsignale erzeugt und vom Messverstärker nicht gänzlich unterdrückt werden kann. Gegenüber CCD-Chips haben PSD-Sensoren eine höhere Abtastfrequenz, da kein schrittweises Auslesen eines Sensor- bzw. Speicherregisters notwendig ist und der Photostrom direkt ausgelesen werden kann. Durch den Einsatz von speziellen Filtern weisen PSD-Chips außerdem eine hohe Stabilität gegenüber Störeinflüssen auf. Bei der Erfassung eines TEM_{00} -Lasers mit einem PSD-Sensor, kann durch die gezielte Defokussierung des Lasers eine zusätzliche Stabilität des Sensorsignals erreicht werden. Die Gauß-förmige Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt dieser Mode führt auch bei defokussiertem Strahl zu einem Photostrom, der als Sensorergebnis den Strahlmittelpunkt liefert. Gleichzeitig wird durch das geringere Intensitätsmaximum eine Überblendung des Sensors verhindert und der größere Auftreffquerschnitt reduziert Störeinflüsse durch das Umgebungslicht (MÄKYNEN 2000). Eine einfache Abschattung des Sensorbereichs gegenüber Lichtquellen in der Umgebung ist trotzdem empfehlenswert, da so eine Sättigung des Photostroms innerhalb des Sensors verhindert wird (WESTERMEIR 2005).

4.2.3 Vier-Quadranten-Photodiode

Die Vier-Quadranten-Photodiode (4QD) ist ein verhältnismäßig einfaches und damit günstiges System zur zweidimensionalen Positionserfassung eines Laserpunkts. Es besteht aus vier Photodioden, die durch Gräben im n-dotierten Oberflächenmaterial optisch voneinander getrennt sind (Bild 4-5).

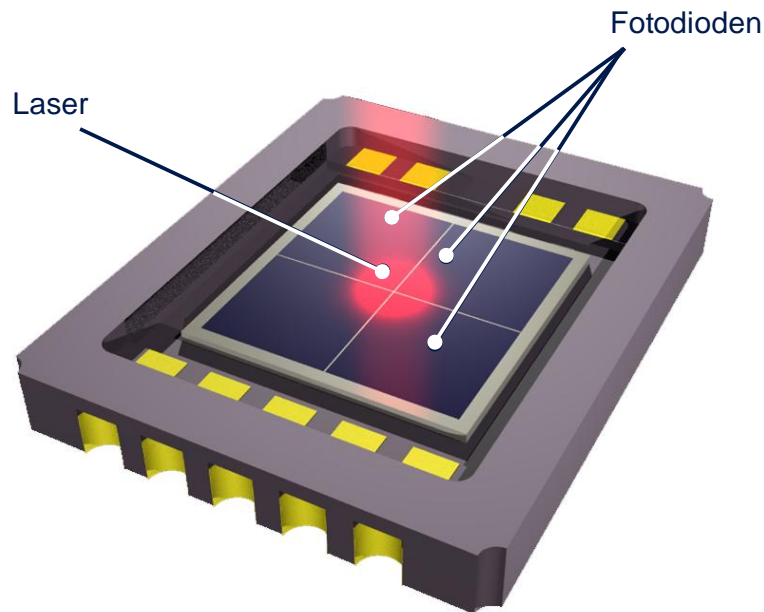


Bild 4-5: Aufbau einer Vier-Quadranten-Photodiode (ENGEL 2002)

Für eine Positionsbestimmung muss der Laser so ausgerichtet sein, dass ein Teil des Strahls auf jede der vier Dioden auftrifft. Der Ort des Strahlmittelpunkts wird dann durch die Interpolation der Intensitätsunterschiede der Photoströme der einzelnen Dioden berechnet (MCINTYRE ET AL. 1970). Vier-Quadranten-Photodioden besitzen aufgrund ihres Aufbaus und der einfachen Auswerteelektronik eine sehr hohe Abtastrate. Die Messgenauigkeit einer 4QD wird in der Regel durch die Querstreuung des Lichts zwischen den Dioden begrenzt und liegt bei ca. 10 μm (FAN ET AL. 2000).

Ein Nachteil der Vier-Quadranten-Photodiode ist ihre abnehmende Genauigkeit bei zunehmender Mittenabweichung des Laserauftreffpunkts. Ist die Diodenanordnung im Nullpunkt noch sehr genau, ist eine Positionsmessung bei stärkerer Abweichung nur noch qualitativ möglich. Ihre Verwendung empfiehlt sich daher vornehmlich in Fällen, bei denen eine statische, exakte Nulllage des Messlasers angestrebt wird (WESTERMEIR 2005).

5 Mathematische Grundlagen

5.1 Überblick und Einordnung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die mathematischen Grundlagen, die in der vorliegenden Arbeit Verwendung finden. Betrachtet werden Algorithmen und Berechnungsmethoden, die über ingenieurwissenschaftliche Grundlagen hinausgehen.

Vorgestellt werden sowohl die für die Problemlösung, die Algorithmenentwicklung, die Simulation und die Versuchsauswertung relevanten Verfahren als auch die mathematischen Grundlagen, auf die die Auswertungen der Sensorsignale und Positionsrechnung bei der Laserreflexiven Positionierung zurückgeführt werden können. Diese Grundlagen umfassen numerische Lösungsverfahren nichtlinearer Gleichungssysteme und mathematische Optimierungsmethoden auf Basis evolutionärer Theorien.

5.2 Trust-Region-Verfahren zur numerischen Lösung von Gleichungssystemen

Trust-Region-Methoden sind in der Algorithmentheorie und in der angewandten Optimierung verbreitete Verfahren zur nichtlinearen Minimierung. Sie eignen sich insbesondere zur Lösung nichtlinearer Probleme und Gleichungssysteme. Sie können sowohl für Probleme ohne Nebenbedingungen als auch für solche mit eingeschränktem Parameter- und/oder Lösungsraum angewendet werden (JARRE ET AL. 2004).

Für eine Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ wird das Minimierungsproblem

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad (5.1)$$

betrachtet. Die Funktion $f(x)$ kann dabei sowohl eine separate Funktion als auch die Summe mehrerer multidimensionaler Funktionen darstellen. Ausgehend von einem bekannten Punkt x_k und dessen Funktionswert $f_k = f(x_k)$ wird die Funktion über die Taylor-Formel lokal quadratisch angenähert. Das so entstehende Modell der Funktion wird beschrieben durch

$$\Phi_k(d) := f_k + g_k^T d + \frac{1}{2} d^T B_k d \approx f(x_k + d) \quad (5.2)$$

Dabei entspricht g_k dem Wert des Gradienten der Funktion $f(x)$ an der Stelle x_k und B_k der Hesse-Matrix der Funktion im Punkt x_k (MEYBERG ET AL. 2009).

$$g_k = g(x_k) = \nabla^T f(x_k) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) \quad (5.3)$$

$$B_k = B_k^T \approx H(x_k) = \nabla^2 f(x_k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Durch das Funktionsmodell lässt sich ein quadratisches Hilfsproblem beschreiben, das mit einer herkömmlichen Differentiationsrechnung lösbar ist. Für eine positive Zahl $\Delta_k > 0$ ist dieses so genannte Trust-Region-Problem definiert durch:

$$\min \Phi_k(d) \quad \text{mit } d: \|d\|_2 \leq \Delta_k \quad (5.5)$$

Für kleine d ist die Übereinstimmung von $\Phi_k(d)$ mit $f(x_k + d)$ sehr gut, da in $d = 0$ Wert und Ableitung der beiden Funktionen identisch sind. Für ausreichend kleine Werte von Δ_k kann man daher davon ausgehen, dass die Lösung von Gleichung (5.5) eine gute Näherung für das Minimum von $f(x_k + z)$ im Bereich $\{z \mid \|z\|_2 \leq \Delta_k\}$ darstellt. Innerhalb dieses Bereichs (Trust-Region) vertraut man darauf, dass die Approximation Φ_k die Funktion f korrekt abbildet. Der Radius des Vertrauensbereichs ist Δ_k (Trust-Region-Radius) (JARRE ET AL. 2004).

Um mit der entwickelten Näherung ein Minimum für die ursprüngliche Funktion $f(x)$ zu finden, geht man nun wie folgt vor: Sei s_k die durch die Nullstelle des Gradienten $\nabla \Phi(x)$ definierte Optimallösung von (5.5), lässt sich eine Verringerung des Funktionswerts $\Phi(x)$ der Art

$$pred_k := \Phi_k(0) - \Phi_k(s_k) \geq 0 \quad (5.6)$$

vorhersagen (predicted reduction). Nun wird der Funktionswert $f(s_k)$ berechnet und wiederum eine Reduktionsgleichung bezogen auf den Wert der Funktion im Ursprungspunkt aufgestellt.

$$ared_k := f(x_k) - f(x_k + s_k) \quad (5.7)$$

Diese Differenz entspricht der tatsächlichen Verringerung des Funktionswerts für das vorhergesagte Minimum x_k (actual reduction). Wenn nun die im Modell vorhergesagte Reduktion gut mit der tatsächlichen Reduktion übereinstimmt, wird angenommen, dass das Modell belastbar ist, und der Vorgang wird, ausgehend von $x_{k+1} = x_k + s_k$, wiederholt. Der Vertrauensradius wird dafür zunächst vergrößert mit dem Ziel, bei der nächsten Iteration einen noch größeren Fortschritt bzw. eine noch stärkere Reduktion zu erreichen. Als Maß für die Güte der Übereinstimmung von vorhergesagter und tatsächlicher Verringerung dient der Quotient

$$r_k := \frac{ared_k}{pred_k}. \quad (5.8)$$

Weicht die vorhergesagte Verringerung stark von der tatsächlichen ab, ist anzunehmen, dass die lokale quadratische Approximation (5.2) nur für einen kleineren Bereich um x_k zulässig ist. Deshalb wird $x_{k+1} = x_k$ gesetzt (Nullschritt) und der Radius Δ_k verringert. Ggf. wird gleichzeitig die Approximation B_k verbessert oder an der Stelle x_k eine neue quadratische Näherung durchgeführt. Die Entscheidung, ob ein Nullschritt mit reduziertem Vertrauensbereich durchgeführt oder der Vertrauensbereich erweitert wird, fällt in Abhängigkeit von dem konstanten Grenzkriterium $\eta \in [0, 1]$. Der Wert des Grenzkriteriums wird auf Basis des Konvergenzverhaltens des konkreten Minimierungsproblems so gewählt, dass gilt:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + s_k \text{ für } r_k \geq \eta \\x_{k+1} &= x_k \text{ für } r_k < \eta \text{ (Nullschritt)}\end{aligned}\tag{5.9}$$

Als Abbruchkriterium für die Optimierung wird meist ein Zielwert für die Nullnäherung des Funktionsgradienten $\|g_k\| \leq \epsilon$ definiert, da x_k für $\nabla f(x_k) = 0$ ein stationärer Punkt der Funktion ist.

Für den Beweis der Konvergenz des Verfahrens und seine Anwendbarkeit auf multidimensionale Räume sei an dieser Stelle auf Standardwerke der Optimierung wie JARRE ET AL. (2004), JUNGnickel (2008) oder CONN ET AL. (2000A) verwiesen.

5.3 Evolutionäre Optimierungsverfahren

5.3.1 Einführung und Begriffsdefinitionen

Als evolutionäre Algorithmen werden stochastische Suchverfahren bezeichnet, die die natürliche Evolution nachahmen. Evolutionäre Algorithmen sind Optimierungsprozesse. Dementsprechend erreichen sie keine eindeutige, exakte Lösung, sondern liefern eine bis zu einem bestimmten Grad präzise und funktionale Lösung zu bestimmten Problemen (BÄCK ET AL. 2007).

Ein evolutionärer Algorithmus arbeitet gleichzeitig mit mehreren potentiellen Lösungen, den Individuen. Diese werden untereinander kombiniert und individuell verändert bzw. mutiert, um bessere Lösungen zu erzeugen. Im Verlauf des Algorithmus „überleben“ nur die besten Lösungen, die schlechteren Lösungen werden verworfen. Die Überlebenswahrscheinlichkeit der Individuen wird über eine Fitnessfunktion bestimmt. So verbessert sich die Fitness des Individuenpools immer weiter, bis das beste Individuum einen gewünschten Fitnesswert erreicht hat, d.h. eine ausreichende Lösungsgenauigkeit besitzt. Spezifische Fachbegriffe der evolutionären Optimierung sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst (NISSEN 2000).

5 Mathematische Grundlagen

Fachbegriff	Definition
Individuum	Eine mögliche Lösung, dargestellt durch einen Vektor
Population	Lösungsraum, dargestellt durch eine Matrix, deren Spalten die Individuen repräsentieren
Eltern	Zur Erzeugung eines neuen Individuums ausgewählte Individuen (sing.: Elter)
Nachkommen	Aus den Eltern erzeugtes Individuum
Rekombination	Der Vorgang zur Bildung von Nachkommen aus den Eltern
Mutation	Stochastische Modifikation der Eigenschaften eines einzelnen Individuums
Fitness	Güte einer Lösung bezogen auf das Optimierungsziel
Generation	Iterationsschritt des Verfahrens

Tabelle 5-1: Begriffsdefinitionen der evolutionären Optimierung (NISSEN 2000)

Grundsätzlich unterscheiden sich evolutionäre Algorithmen von anderen stochastischen und deterministischen Suchverfahren in den folgenden Aspekten (POHLHEIM 2000):

- Die Suche findet in einer Population von Punkten statt, nicht in einem einzelnen Punkt.
- Es wird lediglich der Zielfunktionswert als Grundlage für die Suche verwendet.
- Die Suche erfolgt nicht deterministisch, sondern stochastisch.
- Evolutionäre Algorithmen können mehrere Lösungen liefern.
- Evolutionäre Algorithmen arbeiten im kontinuierlichen, diskreten und multimodalen Funktionsraum.
- Die Anwendung ist in der Regel einfach und flexibel, weil die Zielfunktion beliebig gewählt werden kann.

5.3.2 Struktur und Aufbau

Die Grundstruktur eines evolutionären Algorithmus ist in Bild 5-1 dargestellt. Zuerst wird der Suchraum für mögliche Lösungen festgelegt. Anschließend erfolgt die Initialisierung der Anfangspopulation, im Normalfall geschieht dies zufällig im Definitionsbereich der Variablen, d.h. innerhalb des definierten Suchraums. Dann wird jedes Individuum der Anfangspopulation durch die Zielfunktion (Fitnessfunktion) bewertet. Nach vorher spezifizierten Kriterien, wie beispielsweise der Fitness eines Individuums, folgt nun die Auswahl von Individuen zur Erzeugung einer Nachkommen-

generation. Je nach Algorithmus werden die Nachkommen dabei durch Kombination der ausgewählten Individuen, durch Mutation der ausgewählten Individuen oder durch eine Mischung aus beiden Verfahren generiert. Solange das Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, werden iterativ neue Generationen erstellt. Ist das Abbruchkriterium erfüllt, ist das beste Individuum die gefundene Lösung (POHLHEIM 2000).

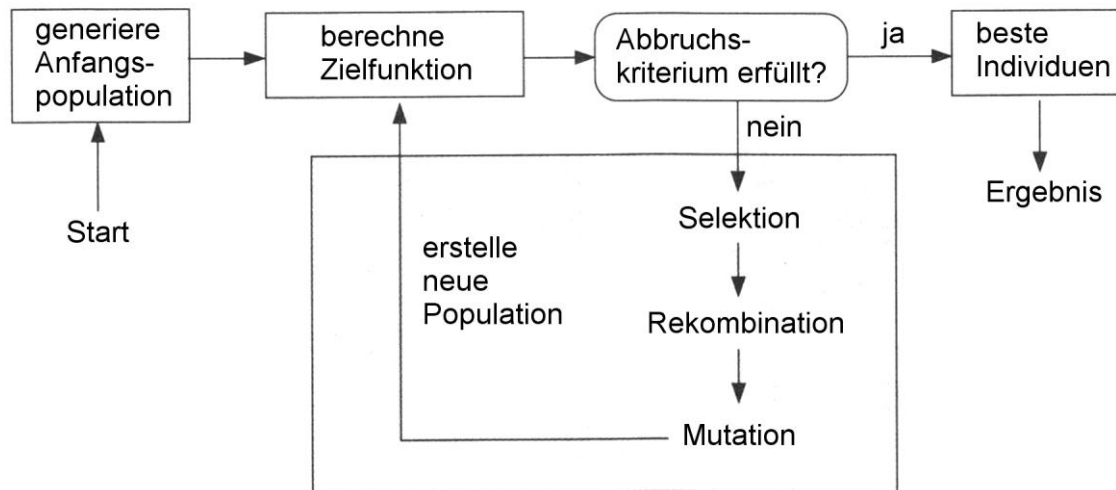


Bild 5-1: Struktur eines einfachen evolutionären Algorithmus (POHLHEIM 2000)

Folgende Fragen sind bei evolutionären Algorithmen vor der Implementierung zu klären:

- Wie wird die erste Generation initialisiert?
- Wie werden die Eltern ausgewählt und wie wird aus ihnen der Nachkomme gebildet?
- Wie ist das Abbruchkriterium definiert?
- Wie wird die Fitness eines Individuums bewertet bzw. wie sieht die Fitnessfunktion aus?

Abhängig von der Beantwortung dieser Fragen werden vier verschiedene Konzepte evolutionärer Algorithmen unterschieden (NISSEN 2000): Genetische Algorithmen (GA), Genetische Programmierung (GP), Evolutionsstrategien (ES) und Evolutionäre Programmierung (EP). Im Folgenden werden diese vier Kategorien näher erläutert.

5.3.3 Genetische Algorithmen

Das Grundkonzept der Genetischen Algorithmen (GA) ist die Imitation evolutionärer Prozesse mit der Betonung genetischer Mechanismen. Bei GA sind die Individuen als binäre Strings, analog zu Bild 5-2, codiert. Die Variablen des Optimierungsproblems

5 Mathematische Grundlagen

entsprechen Segmenten dieses Vektors, wobei die Segmente unterschiedlich lang sein können, je nachdem welche Genauigkeit für die bestimmten Variablen gewünscht ist. Die Bits auf dem String werden üblicherweise als „Gene“ bezeichnet, ihre Ausprägung (0 oder 1) als „Allel“. Um aus dem String die Variablenwerte auszulesen, ist eine spezielle Decodierfunktion nötig (SCHÖNEBURG ET AL. 1996).

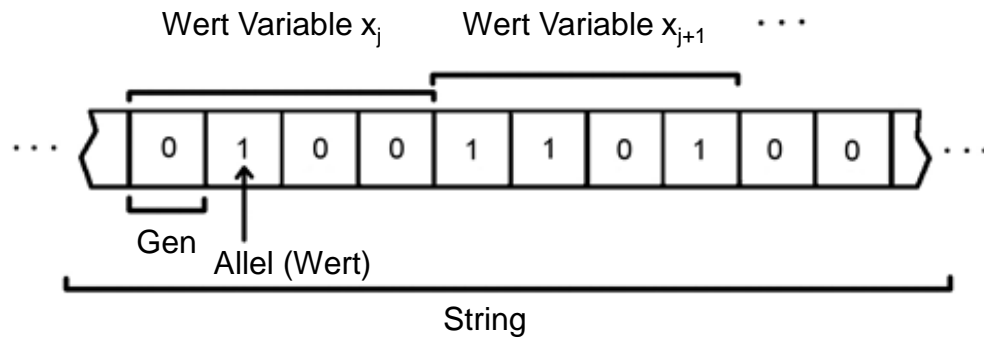


Bild 5-2: Aufbau eines Strings (NISSEN 2000)

Der allgemeine Ablauf eines GA entspricht der Struktur evolutionärer Algorithmen aus Bild 5-1. Bei der Initialisierung werden die Gene der Individuen üblicherweise stochastisch unabhängig voneinander auf Null oder Eins gesetzt. Die Fitnessbewertung der Individuen erfolgt nachdem die Strings decodiert wurden, die Fitnessfunktion setzt sich dementsprechend aus der Decodierfunktion und der Zielfunktion zusammen. Die Selektion der Eltern erfolgt stochastisch, wobei die Selektionswahrscheinlichkeit eines Elters abhängig von dessen Fitnesswert ist (fitnessproportionale Selektion). Pro Elternpaar werden durch verschiedene Crossover- bzw. Rekombinationsvarianten der Eltern genau zwei Nachkommen erzeugt, Bild 5-3 zeigt exemplarisch einen Ein-Punkt-Crossover.

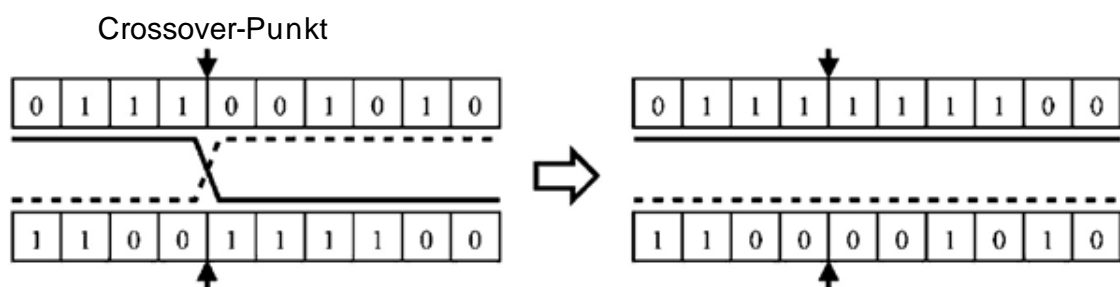


Bild 5-3: Ein-Punkt-Crossover Genetischer Algorithmen (WEICKER 2007)

Bei der anschließenden Mutation werden die einzelnen Bits der Nachkommen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit invertiert, dann werden die Nachkommen in die anfangs noch leere Population übernommen. Dies erfolgt so lange, bis die neue Population λ Individuen enthält. Die Größe der Nachkommenpopulation λ ist dabei abhängig von der Größe der Ursprungspopulation μ und beeinflusst das Konvergenzverhalten und die Geschwindigkeit des Optimierungsverfahrens. Sie wird in der Regel mit-

tels Testläufen ausgehend von dem Standardwert $\lambda = 7 * \mu$ bestimmt. Nach der Vervollständigung der Nachkommenpopulation werden deren Individuen decodiert und über die Fitnessfunktion bewertet, dann folgt eine Überprüfung des Abbruchkriteriums und ggf. die Bildung einer weiteren Population aus der erhaltenen Population (BÄCK ET AL. 2007). Eine genaue Beschreibung der Verfahren kann den Arbeiten von WEICKER (2007), BÄCK ET AL. (2007), NISSEN (2000) und SCHÖNEBURG ET AL. (1996) entnommen werden.

5.3.4 Genetische Programmierung

Bei der Genetischen Programmierung (GP) wird versucht, ein Problem nicht durch die Modifikation bestimmter, das Problem beschreibender Variablen, sondern durch die Erzeugung und Optimierung eines Computerprogramms zu lösen. Eine Population besteht bei der GP aus mehreren Computerprogrammen, welche die Individuen repräsentieren. Letztere werden durch Syntaxbäume beschrieben (Bild 5-4), die aus Elementen des „*function set*“ (Menge der für das Problem brauchbaren Funktionen) und des „*terminal set*“ (Menge der für das Problem brauchbaren Variablen und Konstanten) bestehen. Die Wahl des „*function set*“ und des „*terminal set*“ bestimmen die Menge aller generierbaren Programme. Das „*function set*“ kann aus arithmetischen, mathematischen und Boole'schen Operationen sowie aus Verzweigungen, Iterationen und weiteren anwendungsspezifischen Funktionen bestehen.

Zur Bewertung der Fitness der einzelnen Programme werden diese ausgeführt. Dabei ist das Bewertungskriterium zur Fitnessbestimmung der Grad, bis zu welchem ein Programm die gestellte Aufgabe erfüllt. Dies kann anhand von Simulationen oder des realen Problems geschehen. Vorbereitend für die GP wird zuerst das „*terminal set*“, dann das „*function set*“ bestimmt. Im Anschluss werden Fitnesskriterium, eventuelle Strategieparameter (Populationsgröße, maximale Generationenanzahl) und das Abbruchkriterium festgelegt (BÄCK ET AL. 2007). Nach diesen fünf Schritten folgt der Algorithmus der Struktur aus Bild 5-1. Bei der Initialisierung wird eine Population baumartig strukturierter Programme erzeugt. Das oberste Element wird zufällig aus dem „*function set*“ gewählt, alle weiteren Elemente werden stochastisch aus dem „*function set*“ und dem „*terminal set*“ bestimmt. Wird ein Element des „*terminal set*“ gewählt, wird der dazugehörige Ast beendet, wird ein Element des „*function set*“ gewählt, wird der Ast fortgeführt. Damit die Programme nicht zu groß werden, wird für deren Syntaxbäume eine maximal zulässige Anzahl an Ebenen spezifiziert.

Ist die Ausgangspopulation erstellt, wird die Fitness der einzelnen Individuen bestimmt. Anschließend werden Individuen für eine neue Population entweder durch Reproduktion oder Rekombination bzw. Crossover der vorhandenen Individuen er-

5 Mathematische Grundlagen

zeugt. Die Auswahl des Verfahrens läuft stochastisch mit festgelegten Wahrscheinlichkeiten ab, die verwendeten Individuen werden anhand ihrer Fitness selektiert. Im Falle der Reproduktion wird ein Individuum unverändert in die neue Population übernommen, im Falle des Crossovers werden zwei Individuen nach dem in Bild 5-4 dargestellten Schema kombiniert. Dies wird so oft wiederholt, bis die neue Population vollständig ist (WEICKER 2007). Mutationen einzelner Individuen werden bei der Genetischen Programmierung nicht eingesetzt.

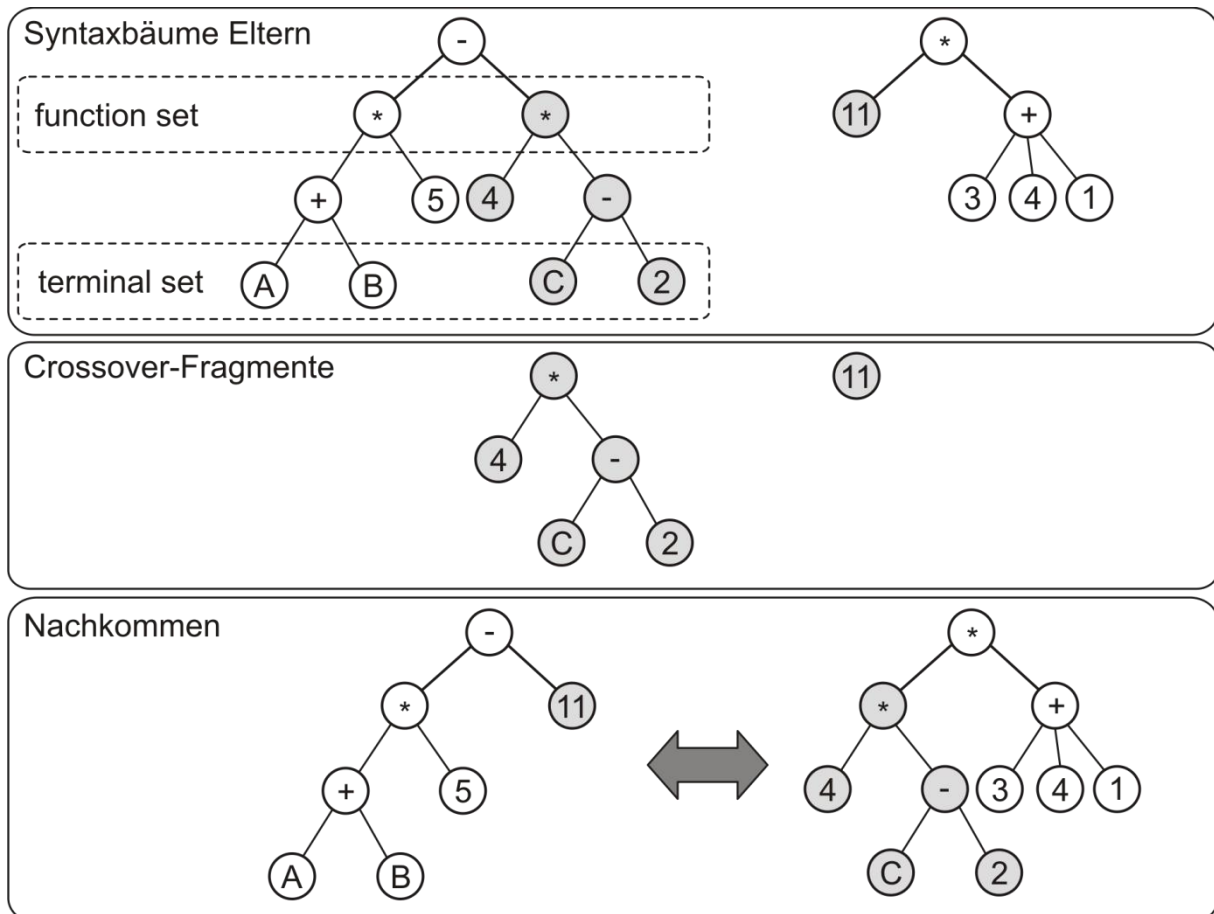


Bild 5-4: Crossover zwischen zwei Programmen [in Anlehnung an Nissen (2000)]

Aus der neuen Population werden wiederum Nachkommen erzeugt, die wiederum eine neue Population darstellen. Dieser Prozess wiederholt sich so lange, bis das Abbruchkriterium greift.

5.3.5 Evolutionsstrategien

Die Evolutionsstrategie (ES) ist eine Optimierungsmethode, bei der die Evolution der Lösungs-Individuen durch die Verwendung von kontinuierlichen, reellwertigen Variablen auf der phänotypischen, also der verhaltensbestimmten Ebene simuliert wird. Die Mutation erfolgt direkt an den Variablen, also an den tatsächlichen Merkmalen der

Funktion und nicht auf der Bit-Ebene der Variablen, wie es bei den Genetischen Algorithmen und der Genetischen Programmierung der Fall ist.

Ziel der ES ist die Optimierung einer Funktion von n kontinuierlichen Variablen ($x_j \in \mathbf{R}, j = 1 \dots n$). Für die zu optimierende Funktion gilt:

$$F: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R} \quad (5.10)$$

Diese Funktion, auch hier Fitnessfunktion genannt, wird als Minimierungsproblem aufgebaut. Jedes Individuum der ES entspricht einem Vektor \vec{x}_i (i : Index des Individuums), dessen Elemente aus n Variablen ($x_{i,j}, j=1 \dots n$) sowie n Standardabweichungen ($\sigma_{i,j}, j=1 \dots n$) gebildet werden. Die Standardabweichungen geben dabei die durchschnittlichen Mutationsschrittweiten der einzelnen Variablen an. Die Mutationsschrittweiten legen fest, wie stark sich die Variablen bei jeder Mutation durchschnittlich verändern, und werden selbstadaptiv angepasst. Ein Individuum der Evolutionsstrategie wird durch einen Vektor der Form

$$\vec{x}_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,n}, \sigma_{i,1}, \dots, \sigma_{i,n})^T \quad (5.11)$$

dargestellt. Der allgemeine Ablauf der ES entspricht, wie auch die GA und die GP, der Struktur evolutionärer Algorithmen aus Abschnitt 5.3.2. Sofern kein Vorwissen zum Optimum vorhanden ist, folgt die Initialisierung der μ Individuen der Elternpopulation gleichmäßig verteilt über den Suchraum. Die Populationsgröße μ muss dabei deutlich größer als 1 gewählt werden, als Standardwert wird $\mu = 15$ empfohlen. Die Standardabweichungen können ebenfalls zufällig bestimmt werden, jedoch wird meist ein Standardwert von $\sigma = 3,0$ gewählt (NISSEN 2000). Empirisch lassen sich allerdings sowohl für die Populationsgrößen als auch für die Mutationsschrittweiten oft bessere, an das Problem angepasste Werte finden.

Nach der Initialisierung wird die Fitness aller Individuen berechnet. Aus der μ Individuen großen Population werden zwei Individuen stochastisch mittels Repetition (Ziehen mit Zurücklegen) als Eltern ausgewählt, die dann zu einem Nachkommen rekombiniert werden. Diese Rekombination kann intermediär oder diskret erfolgen. Bei der intermediären Rekombination erhält ein Nachkomme für jede Variable den Mittelwert der Variablen der Eltern, bei der diskreten Rekombination wird für jede Variable zufällig eine der beiden Variablen der Eltern gewählt. Dieser Vorgang wird λ Mal wiederholt um λ Nachkommen zu erzeugen, die die Nachkommenpopulation bilden. Der Standardwert der Nachkommen-Populationsgröße λ ist $7 * \mu$. Anschließend folgt die Mutation der Nachkommen. Hier werden zuerst die Mutationsschrittweiten durch Multiplikation mit einer logarithmisch normalverteilten Zufallsgröße verändert. Die neue Mutationsschrittweite $\sigma'_{j,k}$ berechnet sich aus der bisherigen Mutationsschrittweite $\sigma_{j,k}$ folgendermaßen (k Index des Nachkommens; j Index des Parameters):

$$\sigma'_{j,k} = \sigma_{j,k} * \exp(\tau_1 * N(0,1) + \tau_2 * N_k(0,1)), \quad k = 1 \dots \lambda, j = 1 \dots n \quad (5.12)$$

In dieser Formel steht der Index k für den Nachkommen und der Index j für den Parameter. τ_1 und τ_2 sind Strategieparameter, die in der Regel zwischen 0,1 und 0,2 gewählt werden. $N(0,1)$ und $N_k(0,1)$ sind standardnormalverteilte Zufallsvariablen mit dem Erwartungswert 0 und der Standardabweichung 1. $N_k(0,1)$ wird dabei nur einmal für den gesamten Nachkommen berechnet, $N(0,1)$ wird dagegen für jede der n Mutationsschrittweiten jedes einzelnen Individuums neu berechnet. Anschließend werden die Variablen $x_{j,k}$ nach folgendem Schema mutiert und bilden die Variablen $x'_{j,k}$ des Nachkommen:

$$x'_{j,k} = x_{j,k} + \sigma'_{j,k} * N_j(0,1), \quad k = 1 \dots \lambda, j = 1 \dots n \quad (5.13)$$

Nachdem die Variablen aller λ Nachkommen mutiert wurden, wird der Fitnesswert jedes Nachkommens bestimmt. Anschließend werden im Rahmen der Selektion die μ besten Individuen für eine neue Population gewählt. Diese Selektion erfolgt entweder als (μ, λ) - oder als $(\mu+\lambda)$ -Selektion. Bei der (μ, λ) -Selektion werden die besten μ Individuen aus den λ Nachkommen ausgewählt, bei der $(\mu+\lambda)$ -Selektion werden die besten μ Individuen aus den μ Eltern und den λ Nachkommen ausgewählt. Nach diesem Schritt folgt eine Überprüfung des Abbruchkriteriums und ggf. ein weiterer Iterationsschritt beginnend mit der Erzeugung neuer Nachkommen durch Rekombination der selektierten Eltern und anschließender Mutation der erzeugten Nachkommen (WEICKER 2007).

5.3.6 Evolutionäre Programmierung

Die Evolutionäre Programmierung ist, wie die Evolutionsstrategie, eine Optimierungsmethode, bei der die Evolution mit kontinuierlichen, reellwertigen Variablen simuliert wird. Jedoch wird bei der Evolutionären Programmierung (EP) kein Wert auf die Einhaltung der Analogie zu Genetik und Fortpflanzungstheorie gelegt. Aus diesem Grund wird bei der EP auf die Rekombination sowie auf andere Operatoren der genetischen Ebene (z.B. Inversion) verzichtet und als einziger Suchoperator die Mutation verwendet. Wie die Evolutionsstrategie geht auch die Evolutionäre Programmierung von der Optimierung einer Funktion $F: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ von n kontinuierlichen Variablen x_j , $j=1 \dots n$ aus, die das Optimierungsproblem darstellt und als Minimierungsproblem aufgebaut wird. Auch nutzt die EP, genau wie die ES, eine Selbstanpassung der Mutationsschrittweiten. Allerdings hängt diese Selbstanpassung nicht von den vorherigen Mutationsschrittweiten, sondern vom Fitnesswert ab. Der Vektor, der in der EP ein Individuum beschreibt, enthält deshalb keine Elemente zur Angabe der Standardabweichungen bzw. der Mutationsschrittweiten der Variablen des Individuums. Ein Individuum \vec{x}_i (i : Index des Individuums) entspricht folglich dem Vektor:

$$\vec{x}_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,n})^T \quad (5.14)$$

Die Initialisierung der Ausgangspopulation mit μ Individuen erfolgt stochastisch gleichmäßig verteilt, indem die Vektorelemente in einem festgelegten Intervall zufällig gewählt werden. Dieses Intervall ist nur für die Initialisierung gültig, anschließend ist der Suchraum offen. Nach der Initialisierung wird der Fitnesswert für jedes Individuum bestimmt. Dieser kann über die Zielfunktion berechnet werden. Sind die Fitnesswerte aller μ Individuen bestimmt, wird von jedem Individuum eine Kopie erstellt, die anschließend mit einer normalverteilten Zufallsgröße, der Mutationsschrittweite, multipliziert wird. Die Mutationsschrittweite hängt dabei vom Fitnesswert des Elters ab. Je schlechter das Individuum, also je höher der Fitnesswert ist, desto größer fällt die Mutationsschrittweite aus. Umgekehrt verkleinert sich die Mutationsschrittweite, je näher die Individuen dem Optimum kommen. Die Parameter der neuen Individuen $x'_{j,k}$ werden durch die Mutation der Parameter der alten Individuen $x_{j,k}$ nach folgendem Schema erzeugt (k: Index des Individuums, j: Index des Parameters):

$$x'_{j,k} = x_{j,k} + \sqrt{k_j * F(\vec{x}_k) + z_j * N_j(0,1)}, \quad k = 1 \dots \mu, j = 1 \dots n \quad (5.15)$$

$F(\vec{x}_k)$ ist der Fitnesswert des Individuums, k_j eine Skalierungskonstante, z_j eine Grundvarianz und $N_j(0,1)$ eine standardnormalverteilte Zufallsvariable mit dem Erwartungswert 0 und der Standardabweichung 1. $N_j(0,1)$ wird für jedes Element eines Individuums neu bestimmt, k_j und z_j werden für jedes Element einzeln festgelegt. Ist die Mutation des Individuums abgeschlossen, wird es zur Population hinzugefügt und sein Fitnesswert bestimmt. Die Population umfasst mit Kopien und deren Mutationen insgesamt $2 * \mu$ Individuen.

Die Selektion der Individuen erfolgt bei der Evolutionären Programmierung über einen direkten Vergleich zwischen den Individuen. Im Unterschied zu den übrigen evolutionären Verfahren, bei denen die Individuen über die gesamte Population hinweg anhand ihres Fitnesswerts selektiert werden, wird bei der EP jedes Individuum der Eltern und Nachkommen paarweise h anderen Individuen gegenübergestellt. Standardwerte für h sind $0,05 * \mu$ bis $0,1 * \mu$, h ist dabei immer größer oder gleich 1. Die Gegner für einen paarweisen Vergleich werden stochastisch gleichverteilt mittels Repetition (Ziehen mit Zurücklegen) aus allen Eltern und Nachkommen der aktuellen Population ausgewählt. Das Individuum mit dem besseren Fitnesswert gewinnt, die Anzahl der Siege wird für jedes Individuum gespeichert. Anschließend folgt die Sortierung der Individuen nach der Anzahl ihrer Siege. Die μ besten Individuen bilden die neue Population. Bei gleicher Anzahl an Siegen zweier Individuen kommt das mit dem niedrigeren, also besseren Fitnesswert in die neue Population. Nach der Selektion folgt die Überprüfung eines Abbruchkriteriums, das Ergebnis der Optimierung ist das beste während der gesamten Laufzeit gefundene Individuum (NISSEN 2000; WEICKER 2007).

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

6.1 Sensorkonzept zur Laserreflexiven Positionierung

6.1.1 Randbedingungen

Die Montage mikrooptischer Systeme und MOEMS-basierter Produkte unterliegt spezifischen Randbedingungen, die im Bereich der Bauteilpositionierung zu zentralen Herausforderungen führen. Herkömmliche Sensorsysteme und Justagekonzepte sind nicht in der Lage, die bei der Bauteillagebestimmung entstehenden Probleme wie die Positionsbestimmung in alle räumlichen Freiheitsgraden, die schlechte Bauteilzugänglichkeit und die Erfassung fügeferener Referenzelemente zu lösen (vgl. Kapitel 3). Dies gilt insbesondere für die Montage von Mikroschwing- oder Mikrokippspiegeln. Stellt man diese Tatsache in den Kontext technischer Grundelemente mikrooptischer Systeme und der zur Mikromontage eingesetzten Systemtechnik, die in den Kapiteln 1 und 2 umfassend diskutiert worden sind, wird deutlich, dass ein großer Bedarf an Sensortechnologien zur Positionierung von beweglichen Mikrospiegeln existiert. Ob die Sensorik in automatisierten Mikromontagesystemen eingesetzt wird oder als Positionierungshilfe für semimanuelle Arbeitsplätze dient ist dabei offen. Im Optimalfall lassen sich mit einer Methode beide Montagetechnologien abdecken.

Bei der Entwicklung einer Sensorik zur Spiegellagebestimmung gilt es, die folgenden Anforderungen zu erfüllen (vgl. Abschnitt 3.2):

- Positionsbestimmung in sechs räumlichen Freiheitsgraden,
- Positionsbestimmung trotz schlechter Bauteilzugänglichkeit,
- Positionsbestimmung bezüglich fügeferner Referenzen.

Weitere Anforderungen ergeben sich aus produktspezifischen Eigenschaften und können nicht allgemeingültig formuliert werden. Vorrangiges Ziel der Ableitung von Anforderungen an Montagesystem und Positionssensorik ist dabei immer die Herstellung der korrekten Produktfunktionalität mit ausreichender Genauigkeit, Qualität und Sicherheit. Gängige optische, Spiegel-basierte, hybrid aufgebaute Produkte – wie Mikroprojektoren, optische Schalter und Router sowie Mikrolaserscanner – erfordern funktionsbedingt eine Positionsgenauigkeit der verbauten optischen Komponenten von unter 5-10 μm und eine Winkelgenauigkeit von unter $0,01^\circ$ (MOHAUPT ET AL. 2010). Diese Grenzwerte werden daher auch für die berührungslose Positionssensorik als Anforderungen gesetzt.

In den folgenden Abschnitten wird mit der Laserreflexiven Positionierung eine Sensorik zur Lagebestimmung von Mikrokippspiegeln vorgestellt, die alle oben genannten Anforderungen erfüllt. Zuerst werden die Funktionsweise der entwickelten Sensorik und die zugrunde liegende Methodik zur Positionsbestimmung erläutert. Im Anschluss werden die optischen, geometrischen und mathematischen Zusammenhänge zur Berechnung der Spiegelposition ausführlich diskutiert. Prinzipbedingt kommt es bei der Laserreflexiven Positionierung zu einer starken Informationsreduktion der sechs räumlichen Freiheitsgrade der Spiegelposition auf ein zweidimensionales Muster. Die wissenschaftlichen Ziele des Kapitels sind zum einen der theoretische Nachweis, dass die Berechnung der Bauteilposition trotz der starken Datenreduktion mit ausreichender Genauigkeit in für die Mikromontage geeigneter Zeit möglich ist, und zum anderen die Entwicklung einer allgemeingültigen, mathematischen Methode zur Lösung des Positionsproblems. In Abschnitt 6.2 wird zuerst ein Simulationsmodell vorgestellt, mit dem der Strahlengang des Lasers – ausgehend von der Laserquelle über den beweglichen Spiegel bis hin zur Sensorfläche – berechnet werden kann. Aus diesem Modell lässt sich das entstehende Reflexionsmuster ableiten und zeigen, dass eine eindeutige Positionierung möglich ist. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 6.3 mathematische Algorithmen zur Berechnung der Spiegelposition entwickelt und hinsichtlich ihrer theoretischen Positioniergenauigkeit analysiert. Hier stellt die starke Datenreduktion des Sensorkonzepts eine große Herausforderung dar. Eingangsparameter für die Algorithmen sind die mithilfe des Simulationsmodells aus Abschnitt 6.2 berechneten Reflexionsmuster. Abschnitt 6.4 fasst abschließend alle Ergebnisse des Kapitels zusammen.

6.1.2 Konzept und Funktionsweise

Methoden, die bei herkömmlichen Sensorsystemen zur Erfassung von Positionsdaten eingesetzt werden, arbeiten bei der hochgenauen Montage beweglicher Mikrospiegel unzureichend (vgl. Kapitel 3). *Das im Folgenden entwickelte Sensorkonzept stützt sich deshalb auf die mechatronische Montage, um Produktfunktionen gezielt zur Erfassung von Positionsdaten nutzen und dadurch die Grenzen klassischer Montagesysteme überschreiten zu können.* Die mechatronische Montage ist eine Montagestrategie, die Produkt und Montageroboter systematisch zu einem mechatronischen Gesamtsystem kombiniert. Ziel ist, „Produktkomponenten zur Unterstützung eines automatisierten Montageprozesses“ (ANGERER 2004) zu verwenden. Das zu montierende Produkt und/oder seine Komponenten werden dabei während der Montage über eine passende Schnittstelle mit der Steuerung der Montageanlage verbunden. Die mechatronischen Komponenten des Produkts können so aktiv in den Montageprozess einbezogen werden. Der entstehende Verbund aus Montageobjekt und Robotersystem besitzt zum Teil

6.1 Sensorkonzept zur Laserreflexiven Positionierung

gemeinsame Sensoren, Aktoren und/oder Softwarefunktionen (Bild 6-1). Die Grundlagen zu dieser Montagestrategie wurden im Jahr 2004 von ANGERER (2004) vorgestellt.

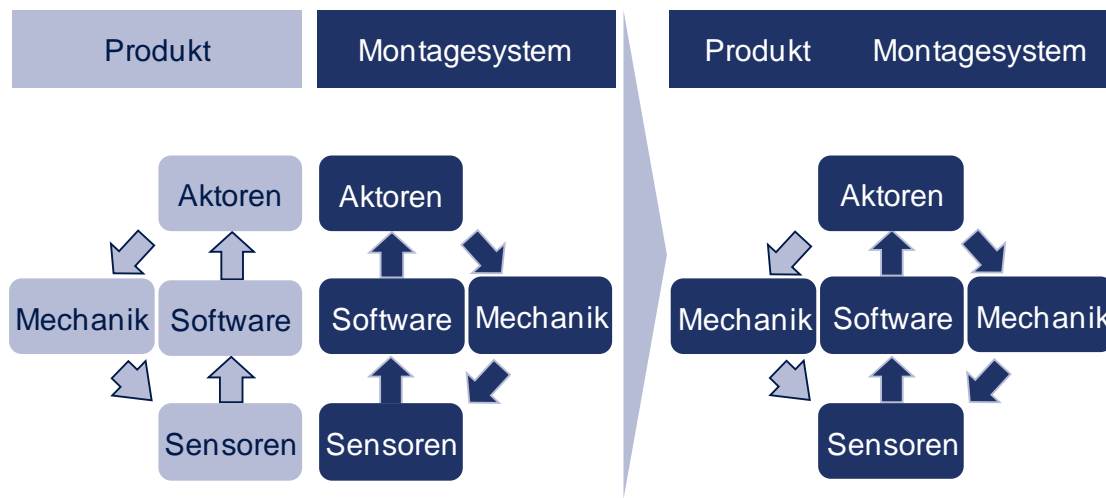


Bild 6-1: Zusammenschluss von Produkt und Montagesystem (ANGERER 2004)

ANGERER (2004) betrachtet die mechatronischen Montage besonders unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, da durch die Verwendung von Produktkomponenten redundante Systeme innerhalb des Montagesystems eingespart werden können. Durch die problemspezifische Nutzung von Produktfunktionen können allerdings auch die Fähigkeiten einer Montageanlage über ihre Systemgrenzen hinaus erweitert werden. Dieser Ansatz wird bei der Laserreflexiven Positionierung verfolgt.

Produkte, die auf MOEMS-Spiegeln aufbauen, besitzen in der Regel drei funktionale Kernelemente. Diese Elemente sind erstens optische Referenzkomponenten, zweitens optische Funktionselemente und drittens Aktoren (vgl. Abschnitt 3.4). Sie lassen sich in optische und mechatronische Subsysteme unterteilen. Optisch funktionelle Komponenten sind die Spiegelfläche selbst und die für die Systemfunktionalität benötigte Laserquelle. Letztere ist je nach Produkt entweder in Form eines Diodenlasers bereits in das Produkt eingebaut, wie z.B. bei Mikroprojektoren, oder wird als Messlaser von außen in das System eingekoppelt. Mechatronische Kernelemente Mikrospiegel-basierter Produkte dagegen sind die Aktoren der Spiegelbaugruppen. Diese arbeiten mit elektrostatischen, elektromagnetischen oder piezoelektrischen Wirkprinzipien. Bild 6-2 gibt einen Überblick über die relevanten funktionalen Bausteine.

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel



Bild 6-2: Relevante Komponenten bei der mechatronischen Montage mikrooptischer Spiegelsysteme

Werden die Aktorelemente vor dem Zusammenbau des Produkts mit dem Montagesystem gekoppelt, dann lässt sich die Aktorik der beweglichen Mikrospiegel bereits ansteuern, während der Spiegel oder die ihn beherbergende Baugruppe noch im Endeffektor des Montageroboters gegriffen ist. So ist es möglich den Spiegel entsprechend seiner späteren Funktion in einem definierten Winkelbereich ($\pm \varphi_s$) entweder statisch auszulenken oder harmonisch anzuregen. Das Wirkprinzip des Aktors beeinflusst die Art der Ansteuerung und die konstruktive Umsetzung der Schnittstelle zwischen Greifer und Produktkomponente, nicht jedoch die Freiheitsgrade der Spiegelbewegung. Diese sind ausschließlich von der Spiegellagerung abhängig. Bringt man den Spiegel nun in den Strahl eines niedrig-energetischen Lasers, wird der Strahl über die Spiegelfläche reflektiert. Durch die Auslenkung oder Schwingung des Spiegels entsteht ein charakteristisches positionsabhängiges Reflexionsmuster, das zur berührungslosen Erfassung zusätzlicher Bauteillageinformationen genutzt werden kann.

Wird das Muster mithilfe eines in das Montagesystem integrierten optischen 2D-Sensors aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 4.2), kann mit den im Folgenden entwickelten Algorithmen die Position der Spiegelfläche und der Spiegeldrehachse berechnet werden. In Bild 6-3 ist das Sensorprinzip vereinfacht skizziert. Die durch einen korrekt montierten Spiegel (Spiegel in Soll-Position) erzeugten Reflexionspunkte sind als P_s , die Punkte eines um Δ_{SP} verschobenen Spiegels vor der Feinpositionierung (Spiegel in Ist-Position) als P_i bezeichnet. Die Abstände von Null- und Scheitelpunkten des Reflexionsmusters der Ist-Position gegenüber dem der Soll-Position sind durch Δ_1 bis Δ_3

6.1 Sensorkonzept zur Laserreflexiven Positionierung

gekennzeichnet. T_1 und T_2 markieren die Abstände der Scheitelpunkte gegenüber dem Nulldurchgang eines Musters.

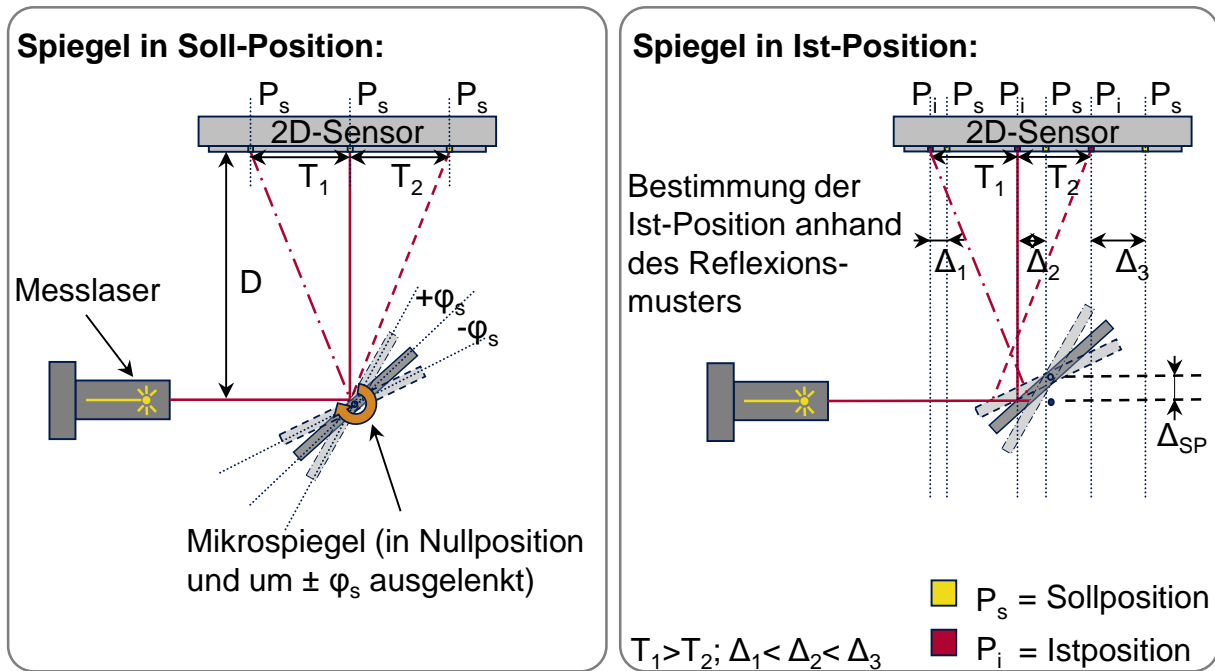


Bild 6-3: Prinzipskizze der Laserreflexiven Positionierung

Als Laserquelle für die Laserreflexive Positionierung von Mikrokippspiegeln kann, falls vorhanden, ein im Produkt verbauter Diodenlaser oder ein zusätzlicher Messlaser genutzt werden. Ersterer wird gemäß der mechatronischen Montage über eine Schnittstelle mit dem Montagesystem verbunden. Letzterer kann als Systemkomponente direkt in das Montagesystem integriert werden. Vor der Laserreflexiven Positionierung muss der Spiegel durch eine Grobpositionierung der Achsen des Montageroboters in den Strahl des Produkt- oder Messlasers eingebracht werden. Sobald der Laser auf der Fläche des optischen Sensors detektiert wird, kann eine geregelte Feinpositionierung durchgeführt werden.

6.2 Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung

6.2.1 Reflexionsmusterberechnung

Ziel des Simulationsmodells ist es, das Muster darzustellen, das durch die Reflexion eines Lasers an einem bewegten Mikroschwingspiegel auf einem optischen 2D-Sensor erzeugt wird. Ausgegangen wird von einer Ausbreitung des Lasers in Luft, also in einem optisch homogenen Medium. Zur Berechnung des Strahlengangs können Wellencharakter und Intensitätsverteilung daher vernachlässigt und die Prinzipien der geometrischen Optik angewendet werden (vgl. Abschnitt 4.1).

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

Die Eingangsgrößen der Simulation sind die Position der Laserquelle, der Vektor des emittierten Laserstrahls, die Position der Spiegelfläche, deren Mittelpunkt und die Drehachse des Spiegels sowie die Lage des Sensors, die durch dessen Normalenvektor und dessen Mittelpunkt definiert ist. Die gegebenen Parameter und ihre mathematischen Bezeichnungen sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst. Dabei werden die Indizes l für laserrelevante Größen, s für spiegelbezogene Parameter und d für Sensor- bzw. Detektorgrößen verwendet.

Math. Bezeichner	Eingangsgröße
P_l	Ursprungspunkt des Lasers
\vec{v}_l	Vektor des Laserstrahls vom Ursprungspunkt
P_s	Mittelpunkt des Spiegels und Ursprungspunkt des Spiegelkoordinatensystems
$\alpha_s; \beta_s; \gamma_s$	Eulerwinkel des Spiegelkoordinatensystems in Drehreihenfolge
\vec{n}_{s0}	Normalenvektor des Spiegels in Nullstellung
\vec{n}_s	Normalenvektor des Spiegels
\vec{d}_s	Drehachse des Spiegels
ϵ_s	Winkelamplitude der Spiegelschwingung
P_d	Mittelpunkt des optischen 2D-Sensors (Detektor)
\vec{n}_d	Normalenvektor des optischen 2D-Sensors (Detektor)

Tabelle 6-1: Eingangsgrößen der Reflexionsmustersimulation

Das spiegeleigene Koordinatensystem ist so orientiert, dass die z-Achse senkrecht zur Spiegelfläche auf dem Spiegelmittelpunkt steht. Die y-Achse liegt auf der Drehachse des Spiegels und die x-Achse ergibt sich aus dem Kreuzprodukt der beiden anderen Achsen. Damit haben Spiegelnormale und Drehachse die folgenden Koordinaten im Spiegelkoordinatensystem:

$$\vec{d}_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_{KOS_Spiegel} ; \vec{n}_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_{KOS_Spiegel} \quad (6.1)$$

Die Lage des Spiegelkoordinatensystems im globalen Koordinatensystem, und damit auch die Lage von Drehachse und Normalenvektor des Spiegels sind eindeutig durch die Eulerwinkel und den Spiegelmittelpunkt definiert. Die Spiegelebene wird durch den Normalenvektor \vec{n}_s beschrieben. Dieser oszilliert bei einer Bewegung des Spiegels

6.2 Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung

um dessen Drehachse \vec{d}_s . Mit dem Drehwinkel ε gilt für den Normalenvektor in Spiegelkoordinaten bei gekipptem Spiegel damit

$$\vec{n}_s = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon \\ 0 \\ \sin \varepsilon \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Um mit den gegebenen Daten das Reflexionsmuster des bewegten Spiegels darstellen zu können, muss zuerst die Reflexion des Laserstrahls am statischen Spiegel berechnet werden. Ausgehend von dem reflektierten Strahl lässt sich der Schnittpunkt zwischen Laserreflexion und Sensor bestimmen und so ein Punkt des Musters auf der Sensorfläche ermitteln. Wiederholt man dieses Vorgehen im Oszillations- bzw. Bewegungsbereich des Spiegels von $-\varepsilon_s$ bis $+\varepsilon_s$ für mehrere Zwischenwinkel, erhält man Stützpunkte durch die das Reflexionsmuster approximiert werden kann. Die Genauigkeit der Musterdarstellung hängt dabei von Anzahl und Abstand der gewählten Zwischenwinkel ab. Um ausreichend viele Stützpunkte in einer passenden Auflösung und mit einer geeigneten Regelmäßigkeit zu generieren, wird eine Schrittweite $\Delta\varepsilon_s$ definiert. Ausgehend vom negativen Scheitelpunkt $-\varepsilon_s$ der Spiegelbewegung wird der Spiegel in Winkelschritten von $\Delta\varepsilon_s$ Stück für Stück um seine Drehachse rotiert und für jede Stellung ein Musterstützpunkt berechnet. Für die Reihenentwicklung der berechneten Winkelstellungen gilt dabei:

$$\varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \Delta\varepsilon; \quad \left| \begin{array}{l} \varepsilon_0 = -\varepsilon_s \\ 0 \leq i \leq \left(\frac{2\varepsilon_s}{\Delta\varepsilon}\right) \end{array} \right| \quad (6.3)$$

Trifft ein Laserstrahl auf eine plane, vollständig reflektierende Oberfläche, ist der Betrag des Strahleinfallwinkels θ_e in der Reflexionsebene gleich dem Betrag des Ausfallwinkels θ_a (KÜHLKE 2011). Die Reflexionsebene ist durch den Richtungsvektor des Lasers und den Normalenvektor der Spiegelebene bestimmt (Bild 6-4). Der Normalenvektor der Reflexionsebene \vec{d}_R kann dabei als Achse verstanden werden, um die der Laserstrahl bei der Reflexion gedreht wird. Der Auftreffpunkt des Lasers auf dem Spiegel ist durch P_{LS} gekennzeichnet.

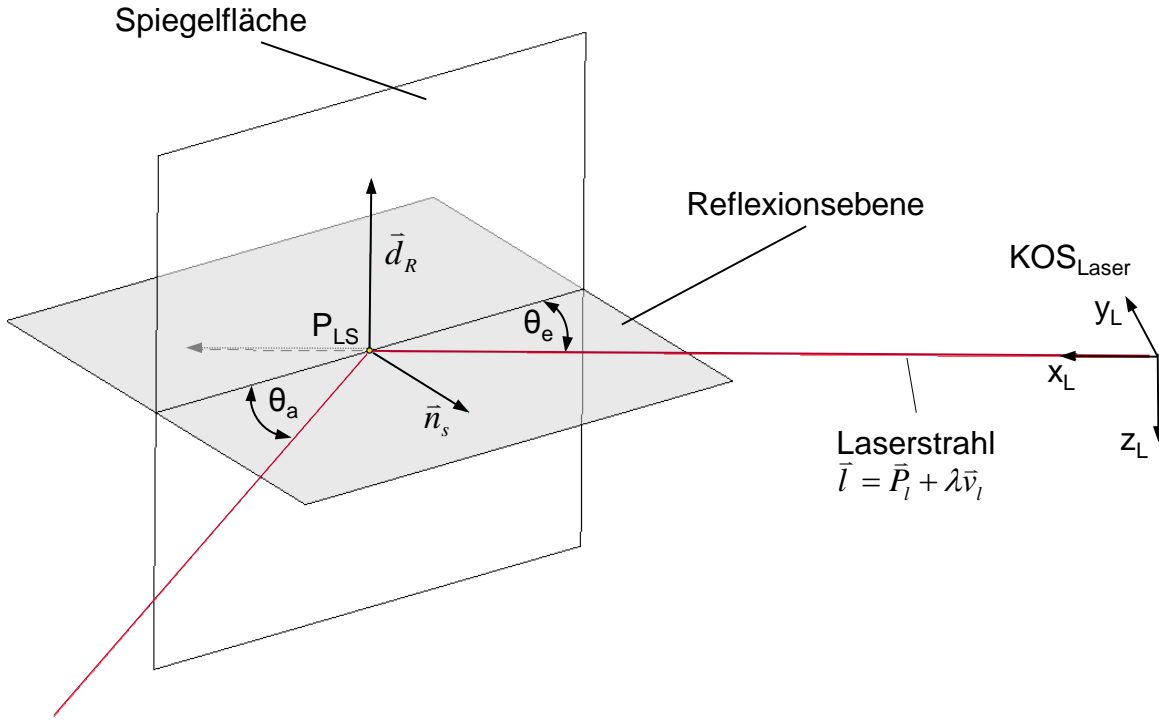


Bild 6-4: Strahlreflexion an einer ebenen, vollständig reflektierenden Oberfläche

Die Berechnung der wesentlichen Stützpunkte des statisch reflektierten Strahls erfolgt sequenziell. Zuerst wird der Schnittpunkt zwischen dem einfallenden Laserstrahl und dem Spiegel bestimmt. Dafür werden sowohl der Laserstrahl als auch die Spiegelebene in Parameterform beschrieben. Die Parameterdarstellung des Laserstrahls kann direkt aus den Eingangsgrößen der Simulation (s. Tabelle 6-1) abgeleitet werden:

$$L: \vec{l} = \vec{P}_l + \lambda \vec{v}_l \quad (6.4)$$

Die Parameterform der Spiegelebene muss mithilfe der Eulerwinkel des Spiegelkoordinatensystems aus dem Spiegelnormalenvektor und dem Spiegelmittelpunkt durch eine Koordinatentransformation berechnet werden. Die dafür notwendige Transformationsmatrix M_{xyz} setzt sich aus den elementaren Denavit-Hartenberg-Drehmatrizen (DH-Drehmatrizen) um die Koordinatenachsen x , y , z mit den Winkeln α_s , β_s und γ_s zusammen (DENAVID ET AL. 1955). Sie ist eindeutig beschrieben durch:

$$M_{xyz} = \begin{pmatrix} \cos \beta_s \cos \gamma_s & -\cos \beta_s \sin \gamma_s & \sin \beta_s \\ \cos \alpha_s \sin \gamma_s + \cos \gamma_s \sin \alpha_s \sin \beta_s & \cos \alpha_s \cos \gamma_s - \sin \alpha_s \sin \beta_s \sin \gamma_s & -\cos \beta_s \sin \alpha_s \\ \sin \alpha_s \sin \gamma_s - \cos \alpha_s \cos \gamma_s \sin \beta_s & \cos \gamma_s \sin \alpha_s + \cos \alpha_s \sin \beta_s \sin \gamma_s & \cos \alpha_s \cos \beta_s \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Für den Spiegelnormalenvektor in Globalkoordinaten gilt damit:

$$\vec{n}_{s_G} = M_{xyz} * \vec{n}_s = M_{xyz} * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \beta_s \\ -\cos \beta_s \sin \alpha_s \\ \cos \alpha_s \cos \beta_s \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

6.2 Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung

Aus dem Normalenvektor und dem Spiegelmittelpunkt kann die Parameterform der Ebenendarstellung der Spiegelebene bestimmt werden:

$$E_S = \vec{P}_s + \mu \begin{pmatrix} -n_{s_G}(2) \\ n_{s_G}(1) \\ 0 \end{pmatrix} + \eta \begin{pmatrix} 0 \\ -n_{s_G}(3) \\ n_{s_G}(2) \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Zusammen mit (6.4) lassen sich daraus folgende Gleichungen zur Berechnung des Auftreffpunkts des Lasers auf dem Spiegel aufstellen:

$$\begin{aligned} I &: P_l(1) + \lambda v_l(1) - P_s(1) + \mu n_{s_G}(2) = 0 \\ II &: P_l(2) + \lambda v_l(2) - P_s(2) - \mu n_{s_G}(1) + \eta n_{s_G}(3) = 0 \\ III &: P_l(3) + \lambda v_l(3) - P_s(3) - \eta n_{s_G}(2) = 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Wird dieses lineare Gleichungssystem nach λ aufgelöst und das Ergebnis in die Geradengleichung des Lasers eingesetzt, ergibt sich für den Auftreffpunkt:

$$\vec{P}_{LS} = \vec{P}_l + \frac{(\vec{P}_l - \vec{P}_s) \circ \vec{n}_{s_G}}{\vec{v}_l \circ \vec{n}_{s_G}} \vec{v}_l \quad (6.9)$$

Ausgehend vom Auftreffpunkt kann der reflektierte Laser durch eine positive Drehung des einfallenden Strahls um den Vektor \vec{d}_R berechnet werden. Letzterer steht senkrecht zu Laservektor und Normalen der reflektierenden Fläche.

$$\vec{d}_R = \vec{v}_l \times \vec{n}_{s_G} \quad (6.10)$$

Dabei entspricht der Drehwinkel dem Zweifachen des Einfallwinkels ρ_e , der sich durch das Skalarprodukt von Normalenvektor der Spiegelfläche und dem Laservektor wie folgt beschreiben lässt:

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} + \rho_e\right) = \frac{|\vec{n}_{s_G} \circ \vec{v}_l|}{|\vec{n}_{s_G}| * |\vec{v}_l|} \quad (6.11)$$

Die zur Berechnung des reflektierten Strahlvektors benötigte Drehmatrix lässt sich durch eine Kombination von Einzeldrehungen erzeugen. Dafür wird sowohl der Laservektor als auch der Vektor \vec{d}_R der Drehachse im gleichen, normierten Koordinatensystem dargestellt. Letzteres wird deckungsgleich zum Globalkoordinatensystem gewählt. Das Koordinatensystem wird zuerst um seine z-Achse ($x'y'z'$) und danach um seine y-Achse gedreht ($x''y''z''$), sodass die z-Achse kongruent zur Drehachse \vec{d}_R liegt. Anschließend folgt eine Drehung um die z-Achse des gedrehten Laserkoordinatensystems um den Winkel $\varphi = 2\rho_e$. Danach wird das Laserkoordinatensystem wieder um seine y-Achse und um seine z-Achse zurück gedreht und damit der Bezug zur ursprünglichen Orientierung wieder hergestellt. Zum besseren Verständnis zeigt Bild 6-5 eine Skizze der Vektoren im normierten Koordinatensystem xyz sowie die Drehungen der Koordinatenachsen und die dazugehörigen Drehwinkel.

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

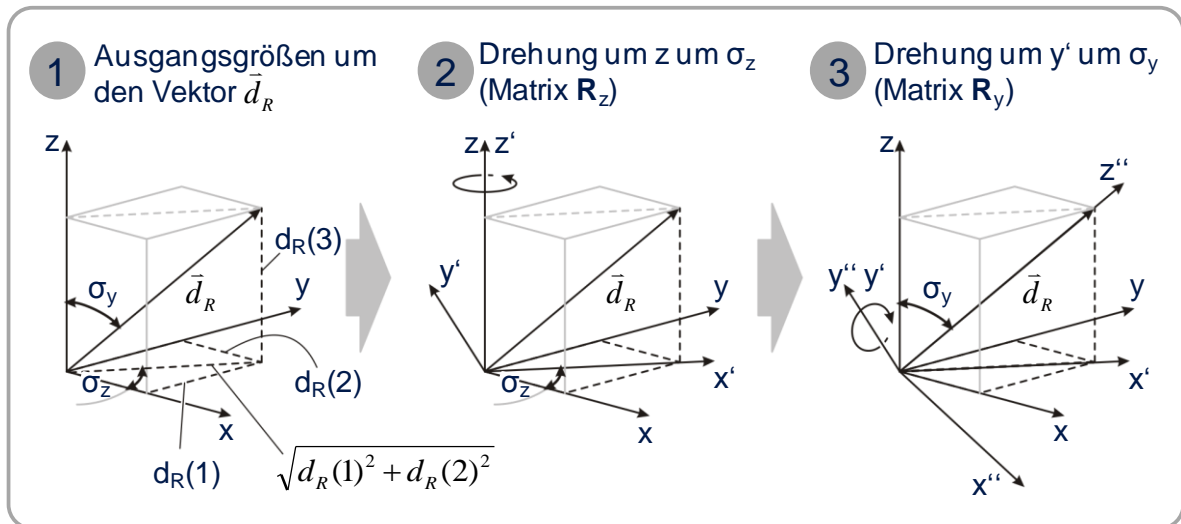


Bild 6-5: Drehungen des körperfesten Koordinatensystems bei Rotation um eine beliebige durch \vec{d}_R gegebene Achse

Aus den trigonometrischen Zusammenhängen und den Komponenten $d_R(1)$ bis $d_R(3)$ der Drehachse \vec{d}_R lassen sich die folgenden Einzeldrehmatrizen ableiten:

$$\mathbf{R}_z = \begin{pmatrix} \frac{d_R(1)}{\sqrt{d_R(1)^2 + d_R(2)^2}} & -\frac{d_R(2)}{\sqrt{d_R(1)^2 + d_R(2)^2}} & 0 \\ \frac{d_R(2)}{\sqrt{d_R(1)^2 + d_R(2)^2}} & \frac{d_R(1)}{\sqrt{d_R(1)^2 + d_R(2)^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{pmatrix} \frac{d_R(3)}{|\vec{d}_R|} & 0 & \frac{\sqrt{d_R(1)^2 + d_R(2)^2}}{|\vec{d}_R|} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{d_R(1)^2 + d_R(2)^2}}{|\vec{d}_R|} & 0 & \frac{d_R(3)}{|\vec{d}_R|} \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

$$\mathbf{R}_\varphi = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.14)$$

Zur Bestimmung der Gesamtdrehmatrix werden die zu den beschriebenen Elementardrehungen gehörenden Matrizen in der Drehreihenfolge multipliziert. Für die Gesamtdrehmatrix gilt dann:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_y^T \mathbf{R}_z^T \quad (6.15)$$

Der reflektierte Laserstrahl kann so durch den Auftreffpunkt des Lasers auf dem Spiegel und den gedrehten Laservektor beschrieben werden. Die Parameterform der Strahlgeraden ist:

$$L_R: \vec{l}_R = \vec{P}_{LS} + \lambda_R (\mathbf{R} * \vec{v}_l) \quad (6.16)$$

6.2 Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung

Zusammen mit der Parameterform der Detektorebene, die analog zu (6.7) aus dem Normalenvektor des Sensors und dem Detektormittelpunkt bestimmt werden kann, lässt sich der Auftreffpunkt des Lasers auf dem Sensor für eine diskrete Spiegelstellung berechnen. Die Vorgehensweise bei der Berechnung entspricht den Schritten (6.7) bis (6.9). Der Auftreffpunkt des Lasers auf der Sensorfläche kann schließlich dargestellt werden durch:

$$\vec{P}_{LD} = \vec{P}_{LS} + \frac{(\vec{P}_d - \vec{P}_{LS}) \circ \vec{n}_d}{(\mathbf{R} * \vec{v}_l) \circ \vec{n}_d} (\mathbf{R} * \vec{v}_l) \quad (6.17)$$

Mit dem durch die Gleichungen (6.4) bis (6.17) beschriebenen Vorgehen können für beliebige Spiegelstellungen Laserauftreffpunkte auf der Sensorfläche berechnet werden. Führt man die Berechnungsschritte für alle mit (6.3) gegebenen Winkelstellungen durch, erhält man das Reflexionsmuster, das durch einen in Schwingung befindlichen Schwingspiegel erzeugt wird. In Bild 6-6 sind Laser, Spiegel, Sensor, der berechnete Strahlengang und das in einer Schwingung erzeugte Projektionsmuster dargestellt. Die Eingangsparameter der dargestellten Projektion haben die in Tabelle 6-2 aufgeführten Werte, die Spiegelposition wurde zufällig gewählt.

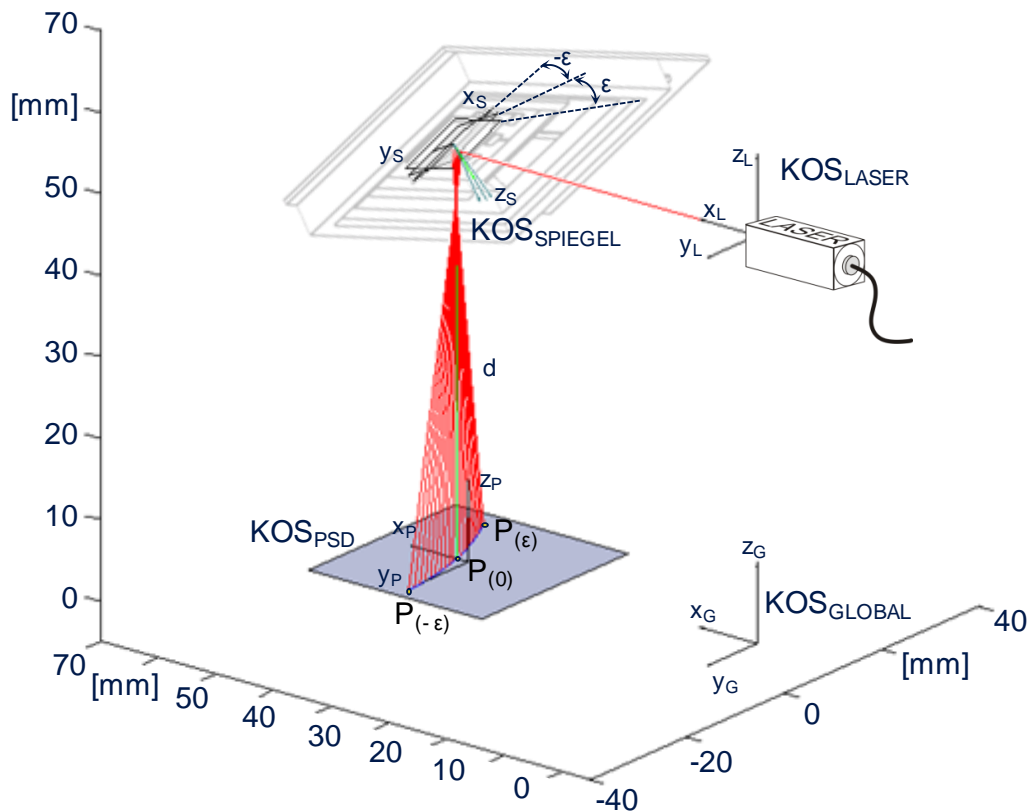


Bild 6-6: Dreidimensionale Visualisierung des Strahlengangs bei der Laserreflexiven Positionierung

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

Bei dem dargestellten Spiegel handelt es sich um einen elektrostatisch einachsrig auslenkbaren Mikrospiegel des Fraunhofer IZM, der für die Simulation als Referenzbauteil genutzt wurde. Die grau skizzierte Baugruppe ist eine hybrid aufgebaute Trägerstruktur, die sowohl Steuerungskomponenten als auch einen Rahmen zur mechanischen Befestigung der Baugruppe und zum Schutz des Spiegels enthält.

Laser	Sensor
$P_l = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 50 \end{pmatrix}; \vec{v}_l = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$P_d = \begin{pmatrix} 50 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{n}_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Spiegel	
$P_s = \begin{pmatrix} 50 \\ 2 \\ 51 \end{pmatrix}; \alpha_s = -136^\circ; \beta_s = 7^\circ; \gamma_s = -97^\circ; \varepsilon_s = [-10^\circ; 10^\circ]; \Delta\varepsilon = 1^\circ$	

Tabelle 6-2: Eingangswerte der in Bild 6-6 dargestellten Strahlengangsimulation

6.2.2 Diskussion des Reflexionsmusters

Bei der Laserreflexiven Positionierung wird die Bauteilposition auf Basis des gemessenen Reflexionsmusters bestimmt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Die zentrale Herausforderung liegt dabei in der Analyse des Musters und der Ableitung von Algorithmen zur Positionsberechnung. Zur Musteranalyse wurde die Spiegelposition, die durch den folgenden Parametersatz beschrieben ist, als Nullposition definiert:

$$P_s = \begin{pmatrix} 50 \\ 0 \\ 50 \end{pmatrix}; \alpha_s = 180^\circ; \beta_s = -45^\circ \text{ und } \gamma_s = -90^\circ$$

Ausgehend von dieser Spiegelposition wurden alle Spiegelparameter einzeln entlang ihrer Freiheitsgrade variiert. Für alle Spiegelpositionen, die durch die entstehenden Parameterkombinationen beschrieben sind, wurden dann die zugehörigen Reflexionsmuster berechnet.

Eine Gegenüberstellung von Positionsparametern und Reflexionsmustern ermöglicht es, den Einfluss einzelner Parameter auf das Muster zu untersuchen. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 dargestellten Zusammenhänge zwischen Positionsparametern und Reflexionsmustern.

6.2 Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung

Positionsparameter	Reflexionsmuster (Nullstelle; Parameter-variiert)	Einfluss auf das Projektionsmuster
Variation: $x = \pm 5\text{mm}$ $y=0; z=0$ $\alpha=0; \beta=0;$ $\gamma=0;$	<p>+ = Nullstelle * = $x_0+5\text{mm}$ o = $x_0-5\text{mm}$</p>	Parallelverschiebung des Musters entlang der x-Koordinate
Variation: $y = \pm 5\text{mm}$ $x=0; z=0$ $\alpha=0; \beta=0;$ $\gamma=0;$	<p>+ = Nullstelle * = $y_0+5\text{mm}$ o = $y_0-5\text{mm}$</p>	Dehnung und Krümmung des Musterparaboloids
Variation: $z = \pm 5\text{mm}$ $x=0; y=0$ $\alpha=0; \beta=0;$ $\gamma=0;$	<p>+ = Nullstelle * = $z_0+5\text{mm}$ o = $z_0-5\text{mm}$</p>	Parallelverschiebung des Musters entlang der x-Koordinate

Tabelle 6-3: Einfluss der translatorischen Freiheitsgrade auf das Reflexionsmuster

In der oben dargestellten Parameterkonstellation ist das Projektionsmuster bei einer Verschiebung des Spiegels in z-Richtung identisch mit dem, das durch eine Verschiebung in x-Richtung erzeugt wird. Die Ursache hierfür liegt in der Lage der Kippachse der Spiegelnulldstellung. Prinzipbedingt kann eine Verschiebung des Spiegels entlang seiner Drehachse am Reflexionsmuster nicht erkannt werden. Bild 6-7 zeigt das Simulationsergebnis für den Spiegel in Nullposition und für die in Tabelle 6-3 dargestellten x- und z-Variationen der Spiegelposition.

Sofern die Verschiebung des Spiegels nicht so groß ist, dass der Laser nicht mehr auf den Spiegel trifft, wirkt sie sich nicht auf die optische Funktion des Mikrospiegels aus. Die Funktionalität des zu montierenden Mikrosystems bleibt ebenfalls unbeeinflusst. Ist dies der Fall, kann eine Fehlpositionierung des Spiegels entlang seiner Drehachse als unkritisch betrachtet werden.

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

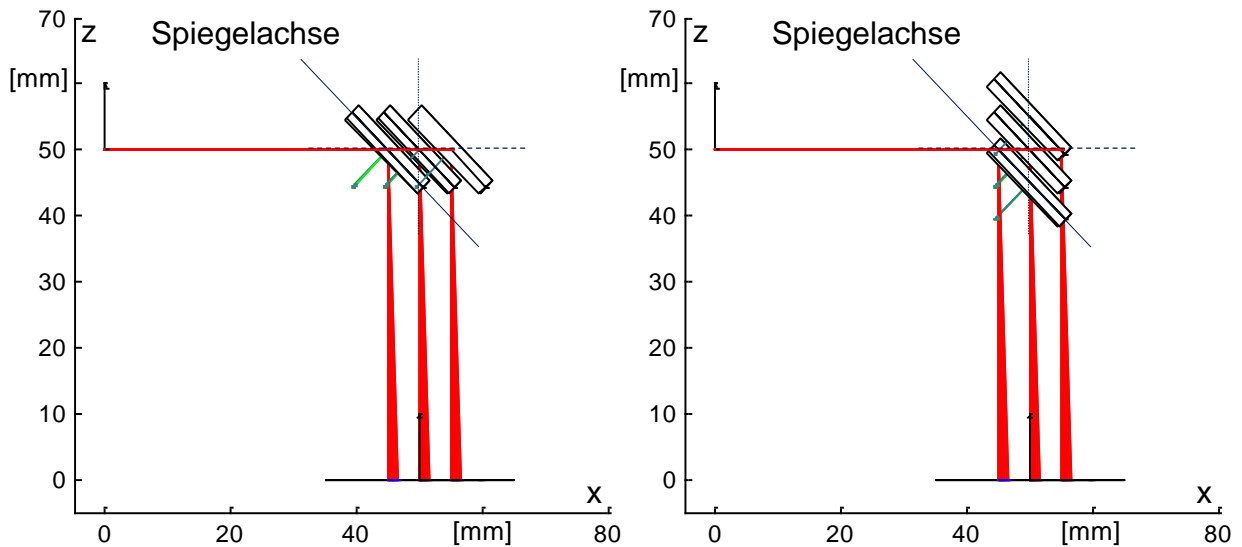


Bild 6-7: Variation der Spiegelstellung in x - (li.) und z -Achse (re.) (vgl. Tabelle 6-3)

Eine Fehlpositionierung, die von der Kippachse des Spiegels abweicht, wirkt sich dagegen deutlich negativ auf die Projektionseigenschaften des Spiegels und die Funktion des zu montierenden Mikrosystems aus. Der funktionsrelevante Positionsfehler entspricht dabei dem Lot des tatsächlichen Spiegelmittelpunkts auf die theoretisch optimale Spiegelkippachse (Bild 6-8). Zur Darstellung und Analyse des Positionsfehlers muss daher die euklidische Länge dieses Lots herangezogen werden. Im Folgenden wird diese Länge als Lotfehler oder drehachsenkompensierter Positionsfehler $\Delta(xyz)_{DK}$ bezeichnet.

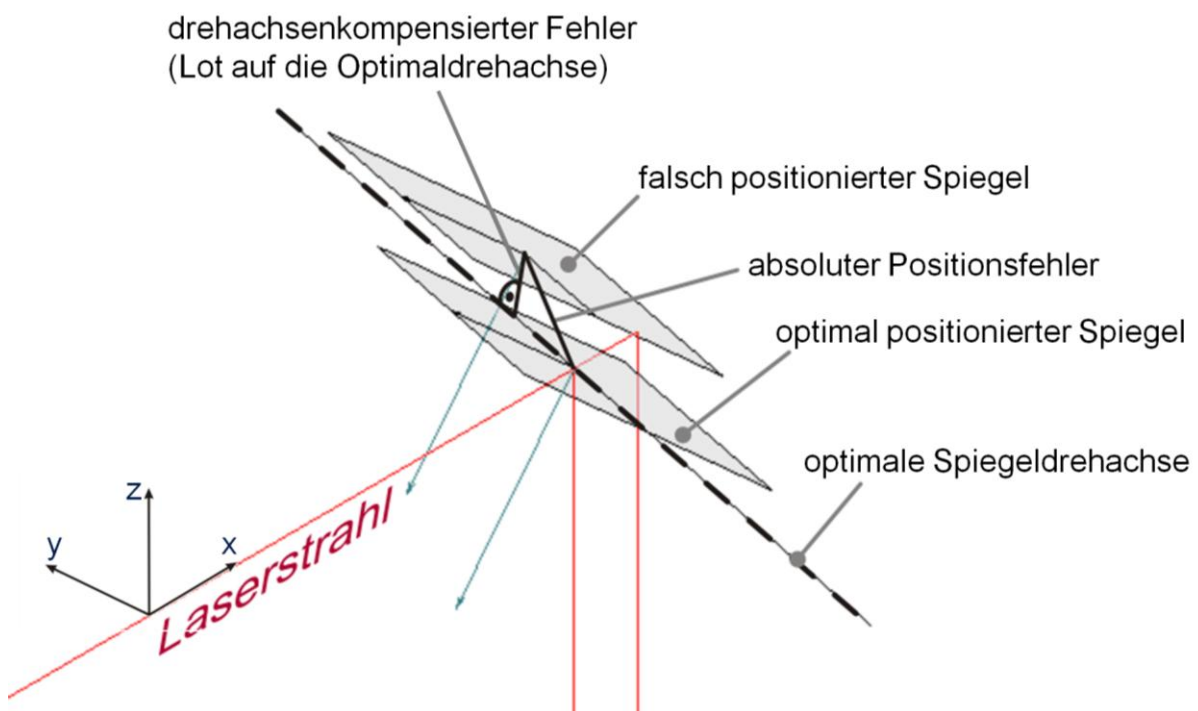


Bild 6-8: Lotfehler bzw. drehachsenkompensierter Positionsfehler

6.2 Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung

Im Gegensatz zu den translatorischen Freiheitsgraden des Spiegels beeinflussen die Spiegelwinkel das Reflexionsmuster eindeutig. Es existieren keine Winkelstellungen durch deren Überlagerung redundante Muster erzeugt werden. Tabelle 6-4 gibt einen Überblick über den Zusammenhang zwischen Spiegelwinkel und Reflexionsmuster.

Positionsparameter	Reflexionsmuster (Nullstelle; Parameter-variiert)	Einfluss auf das Projektionsmuster
Variation: $\alpha = \pm 5^\circ$ $x=0; y=0;$ $z=0$ $\beta=0; \gamma=0$		Verschiebung des Musters entlang der y-Koordinate
Variation: $\beta = \pm 5^\circ$ $x=0; y=0;$ $z=0$ $\alpha=0; \gamma=0$		Verschiebung des Musters entlang der x-Koordinate; Skalierung der Scheitelpunkte
Variation: $\gamma = \pm 5^\circ$ $x=0; y=0;$ $z=0$ $\alpha=0; \beta=0$		Rotation des Musters um die Sensornormale

Tabelle 6-4: Einfluss der Spiegelwinkel auf das Reflexionsmuster

Betrachtet man die in den Tabellen Tabelle 6-3 (s. S. 89) und Tabelle 6-4 simulierten Reflexionsmuster in Abhängigkeit von den als Eingangsparameter genutzten Spiegelpositionen, lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Reduktion der sechs Freiheitsgrade der Spiegelposition auf ein zweidimensionales Muster führt zu einem deutlichen Informationsverlust.
- Alle Eingangsgrößen haben einen direkt messbaren Einfluss auf das Reflexionsmuster.
- Eine begrenzte Verschiebung entlang der Kippachse des Spiegels hat keine Auswirkung auf das Reflexionsmuster.

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

- Zwischen x- und y-Koordinate des Reflexionsmusters besteht ein nichtlinearer Zusammenhang.
- Das erzeugte Reflexionsmuster ist bezüglich der Winkelstellung des Spiegels eindeutig.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich schließen, dass prinzipiell zwei mathematische Verfahren zur Berechnung der Spiegelposition geeignet sind. *Eine Möglichkeit ist die Entwicklung einer analytischen Übertragungsfunktion und deren analytische oder numerische Lösung (Abschnitt 6.3.2). Für dieses Verfahren sprechen der nichtlineare Zusammenhang der beiden Musterkoordinaten und die Eindeutigkeit des Reflexionsmusters. Die zweite Option ist die Umsetzung eines genetischen Optimierungsmodells (Abschnitt 6.3.3). Aspekte, die eine Lösung auf Basis des genetischen Optimierungsmodells begünstigen, sind der direkte Einfluss der Eingangsparameter auf das Muster und die starke Informationsreduktion bei der Laserreflexiven Positionierung.* Im Folgenden werden beide Verfahren entwickelt und verglichen.

6.3 Algorithmen zur Positionsbestimmung

6.3.1 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Berechnung der Spiegelposition sind die Stützpunkte des Reflexionsmusters und die zu den Messpunkten gehörende Stellung der Spiegelkinematik. Je nach Lösungsansatz unterscheiden sich Anzahl und Intervall der zur Berechnung erforderlichen Musterpunkte. Die Anzahl der Messpunkte wirkt sich stark auf die zur Datenerfassung benötigte Zeit aus. Ziel ist es daher, so wenige Punkte wie möglich aber so viele wie nötig zur Positionsbestimmung heranzuziehen.

Für die Entwicklung der Algorithmen zur Positionsbestimmung von Mikrokippspiegeln und die erste Evaluation dieser Algorithmen werden die Musterstützpunkte mit der in Abschnitt 6.2.1 beschriebene Simulation berechnet. Die Spiegelwinkel, die zu den Musterpunkten gehören, werden direkt aus den Eingangsgrößen der Simulation entnommen.

6.3.2 Lösung auf Basis analytisch-numerischer Methoden

6.3.2.1 Allgemeines

Kann ein Problem mathematisch durch eine analytische Übertragungsfunktion beschrieben werden, so lässt es sich theoretisch mit unendlicher Genauigkeit lösen. Im

ingenieurwissenschaftlichen Sinne stellt ein analytisches Modell wegen seiner Genauigkeit und seiner Berechnungsgeschwindigkeit eine optimale Lösung dar. Oft aber ist die Ableitung einer rein analytischen Übertragungsfunktion aufgrund der Anzahl der Eingangsparameter, deren Wechselwirkungen oder der Komplexität einzelner Übertragungstrecken nicht möglich. In diesem Fall kann die analytische Modellierung um numerische Verfahren erweitert und ein analytisch-numerischer Ansatz verfolgt werden.

Bei der Laserreflexiven Positionierung besteht zwischen der Messgröße und der zu berechnende Größe ein funktioneller Zusammenhang der Art $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^6$. Die Position des Spiegels ist räumlich eindeutig durch sechs Freiheitsgrade bestimmt. Diese sollen basierend auf zwei korrelierenden Messgrößen, der x- und y-Koordinate der Sensorfläche, ermittelt werden. Dadurch erhält man ein vierfach unterbestimmtes analytisches Problem. Eine Lösung wird nur durch die Erfassung mehrerer Messpunkte und deren relative Verknüpfung über die bekannte Winkelstellung der Spiegelkinematik möglich. Aus den gemessenen Punkten lässt sich ein Gleichungssystem ableiten, dessen Nullstellen mittels eines numerischen Verfahrens bestimmt werden können. Wesentlich für die Lösung des Gleichungssystems ist die Reduktion der Gleichungskomplexität, da diese maßgeblich das Konvergenzverhalten numerischer Lösungsverfahren beeinflusst. Die geeignete Wahl der Randbedingungen und eine angepasste Darstellung der Eingangsgrößen, im Folgenden Initialraumkonfiguration genannt, sind deshalb entscheidend für die Konvergenz der Lösung. Auf Basis der Initialraumkonfiguration (vgl. Abschnitt 6.3.2.2) kann abhängig von der Anzahl der Eingangsgrößen i_E für jeden Musterstützpunkt ein System aus zwei analytischen Gleichungen in der Form

$$x_P(\mathbb{R}^{i_E}) - x_{P_gemessen} = 0 \quad (6.18)$$

$$y_P(\mathbb{R}^{i_E}) - y_{P_gemessen} = 0 \quad (6.19)$$

gebildet werden. Diese Gleichungen lassen sich über mehrere Messpunkte zu einem Gesamtproblem zusammenfassen (6.3.2.2), das durch ein geeignetes numerisches Verfahren gelöst werden kann (6.3.2.3).

6.3.2.2 Initialraumkonfiguration

Voraussetzung für die analytisch-numerische Berechnung der Spiegelposition ist die Beschreibung des Initialraums. Dabei werden existierende Randbedingungen zusammengefasst, eine geeignete Darstellung der gesuchten Größen und der Eingangsparameter festgelegt sowie die Menge möglicher Lösungen definiert. Nutzt man beispielsweise die in Abschnitt 6.2.1 beschriebene Darstellung der Spiegelposition durch Mittelpunkt, Normalenvektor, Drehachse und Eulerwinkel in der Form $x_P = f(P_l, \vec{v}_l, P_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s, \vec{n}_{s0}, \vec{n}_s, \vec{d}_s, \varepsilon_s, P_d, \vec{n}_d)$, entstehen bei der analytischen Umformung

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

mung der Vorwärtsrechnung Gleichungen von bis zu 2,5 Millionen Zeichen. Die Ursache dafür liegt in den trigonometrischen Termen der Eulerwinkel, die durch die Transformationsmatrizen in jeden Parameter der Spiegelposition und des reflektierten Lasers eingehen. Für die zur Vorwärtsrechnung eingesetzte Initialraumkonfiguration konnte aufgrund der hohen Komplexität der entstehenden Gleichungen kein konvergierendes numerisches Lösungsverfahren gefunden werden. Zur Umformung und numerischen Lösung wurden die Softwaresysteme Mathematica[®] und MatLab[®] (Symbolic Toolbox, Numeric ToolBox) verwendet. Selbst wenn ein konvergierendes Lösungsverfahren hätte gefunden werden können, so ist doch davon auszugehen, dass die Lösung eines Systems aus derart komplexen Gleichungen immense, kaum vertretbare Laufzeiten des Lösungsalgorithmus mit sich gebracht hätte.

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Initialraumkonfiguration maßgeblich die Komplexität der analytischen Gleichungssysteme zur Berechnung der Spiegelposition beeinflusst. Damit bestimmt sie die Lösbarkeit des Problems und die zur numerischen Nullstellenberechnung anwendbaren Verfahren. Ziel und Herausforderung bei der Initialraumkonfiguration liegen in einer mathematischen Beschreibung der Ein- und Ausgangsparameter, die in ein möglichst einfaches, numerisch lösbares Gleichungssystem resultiert.

Ein Ansatz zur Reduktion von Freiheitsgraden und Komplexität ist die Darstellung aller Vektoren in normierten Kugelkoordinaten. Ein dreidimensionaler Vektor hat dann nur noch zwei Freiheitsgrade und ist definiert durch:

$$\vec{v}_{norm_kk} = \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (6.20)$$

Mit dieser Vektorbeschreibung lässt sich eine Initialraumkonfiguration zur Laserreflexiven Positionierung von Mikrospiegeln bilden, die im Vergleich zur Initialraumkonfiguration der Vorwärtsrechnung zu einer deutlich geringeren Gleichungskomplexität führt. Eine weitere Vereinfachung wird durch die geeignete Lage des Globalkoordinatensystems und durch die Ausrichtung der Sensornormalen orthogonal zum Richtungsvektor des Lasers erreicht. Die Nullstelle des Globalkoordinatensystems wird zur Vereinfachung der Spiegelkoordinaten in den optimalen Spiegelmittelpunkt gelegt. Die Koordinatenachsen sind, wie bei der Strahlengangsimulation, entlang des Lasers und der Sensornormalen ausgerichtet. Diese Lage des Globalkoordinatensystems führt dazu, dass mehrere Elemente in den Vektoren zur Beschreibung von Laser und Detektor Nullelemente sind. Daraus folgt eine starke Vereinfachung der Gleichungsterme zur Berechnung der Spiegelposition.

Der Laserstrahl wird ähnlich wie bei der Vorwärtsrechnung durch seine Ausgangsposition $P_l \in \mathbb{R}^3$ und seine Strahlrichtung $\vec{v}_l \in \mathbb{R}^3$ beschrieben, der Detektor durch seinen

Mittelpunkt $P_d \in \mathbb{R}^3$ und seinen Normalenvektor $\vec{n}_d \in \mathbb{R}^3$. In der praktischen Anwendung hängen diese Größen von der Anordnung der Komponenten des Montagesystems ab. Im Anwendungsfall ist es daher wichtig, die Sensorkomponenten so auszurichten, dass die oben genannten Orientierungen der Koordinatensysteme relativ zueinander eingehalten werden. Bei den theoretischen Untersuchungen werden für die Lage von Laser und Detektor die folgenden Werte angenommen:

$$P_l = \begin{pmatrix} -50 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{v}_l = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (6.21)$$

$$P_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -30 \end{pmatrix}; \quad \vec{n}_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (6.22)$$

Das Ziel des analytisch-numerischen Algorithmus ist die Berechnung der Spiegelposition. Sie ist unbekannt und wird in der hier gewählten Initialraumkonfiguration eindeutig durch die Spiegelnormale $\vec{n}_s \in \mathbb{R}^3$, die Spiegeldrehachse $\vec{d}_s \in \mathbb{R}^3$ und den Mittelpunkt des Spiegels $P_s \in \mathbb{R}^3$ beschrieben. Stellt man die Spiegelnormale zur Komplexitätsreduktion durch normierte Kugelkoordinaten dar [vgl. (6.20)], ergibt sich

$$\vec{n}_s(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (6.23)$$

wobei gilt: $0 \leq \theta < 2\pi$ und $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$. Diese Winkeleinschränkungen resultieren aus zwei Randbedingungen:

- Der Laserstrahl kann nur von der beschichteten Seite eines Mikrospiegels reflektiert werden.
- Zur Detektion des reflektierten Laserstrahls kann nur der Halbraum genutzt werden, in dem der Sensor liegt.

Die Drehachse des Spiegels liegt in der Spiegelebene, ist also orthogonal zur Normale. Beschreibt man die Projektion der Drehachse in die x-y-Ebene durch Polarkoordinaten erhält man

$$\vec{d}_s^{xy}(\delta) = \begin{pmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{pmatrix}. \quad (6.24)$$

Dabei stehen hochgestellte Indizes für die jeweiligen Koordinaten des Vektors. Für $0 \leq \delta < 2\pi$ ergibt sich durch die Orthogonalität die dritte Koordinate als

$$d_s^z(\theta, \varphi, \delta) = -\frac{\left(n_s^x(\theta, \varphi) d_s^x(\delta) + n_s^y(\theta, \varphi) d_s^y(\delta) \right)}{n_s^z(\theta, \varphi)} \quad (6.25)$$

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

Für die oben spezifizierten Wertebereiche von θ und φ ist die Drehachse dadurch eindeutig beschrieben. Zusätzlich zu Normalenvektor und Drehachse ist die Lage des Spiegels außerdem durch seinen Mittelpunkt

$$P_s = \begin{pmatrix} x_{P_s} \\ y_{P_s} \\ z_{P_s} \end{pmatrix} \quad (6.26)$$

bestimmt. Die Lage des Spiegels ist durch Normalenvektor (6.24), Drehachse (6.25) und Mittelpunkt (6.26) mathematisch eindeutig definiert. Der Spiegel besitzt damit sechs unabhängige Freiheitsgrade $(x_{P_s}, y_{P_s}, z_{P_s}, \theta, \varphi, \delta)$. Die Messung des Reflexionsmusters liefert pro Stützpunkt einen zweidimensionalen Datensatz (x_p, y_p) . Deshalb müssen aus einem Musterparaboloid mindestens drei Messpunkte extrahiert werden, um die Spiegelstellung eindeutig bestimmen zu können. Die Daten der Messpunkte werden dabei über die bekannte Relativdrehung $\Delta\varepsilon$ verknüpft.

Für die graphische Darstellung der Zusammenhänge und Testläufe des Algorithmus wird die Ideallage eines Spiegels in Globalkoordinaten bei der hier gewählten Initialraumkonfiguration auf die folgenden normierten Parameter festgelegt.

$$P_{s,ideal} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{n}_{s,ideal} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}; \quad \vec{d}_{s,ideal} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.27)$$

Bild 6-9 visualisiert die geometrischen Zusammenhänge der Initialraumkonfiguration mit den durch (6.21), (6.22) und (6.27) festgelegten Positionen von Laser, Sensor und dem Spiegel in Optimalposition (Idealspiegel). Die zur Beschreibung der Spiegelposition in (6.23) und (6.24) eingeführten Winkel sind entsprechend gekennzeichnet.

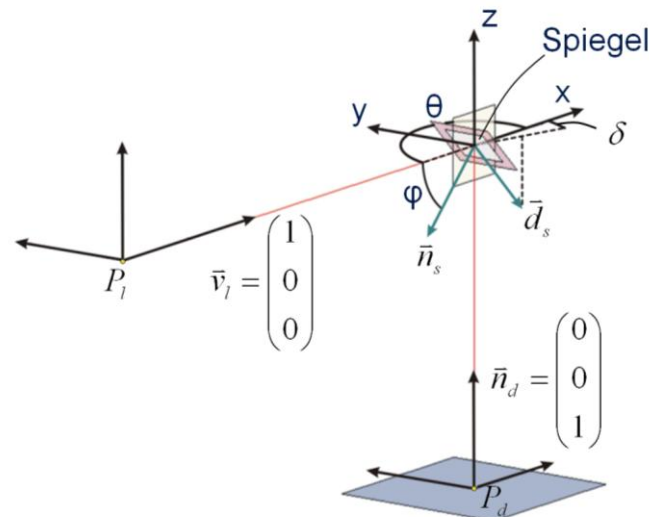


Bild 6-9: Initialraumkonfiguration

6.3.2.3 Gleichungssystem

Aufbauend auf der Initialraumkonfiguration wird im nächsten Schritt ein analytisches Gleichungssystem gebildet, das die Berechnung der Spiegelposition mit einem numerischen Verfahren ermöglicht. Basis dieses Gleichungssystems ist die analytische Beschreibung des Auftreffpunkts des Lasers auf dem Sensor in Abhängigkeit von den Spiegelgrößen:

$$\vec{P}_{LD} = f(x_{PS}, y_{PS}, z_{PS}, \theta, \varphi, \delta, \varepsilon) \quad (6.28)$$

Das Vorgehen zur Herleitung dieser Gleichung entspricht im Wesentlichen den in Abschnitt 6.2.1 ausführlich beschriebenen Rechenschritten zur Strahlengangsimulation. Da die Werte der Spiegelposition als Eingangsgrößen hier aber nicht bekannt sind, ist eine sequentielle Vorwärtsrechnung basierend auf den Eulerwinkeln und der Mittelpunktposition des Spiegels nicht möglich. Auch führt die Integration aller Rechenschritte in eine analytische Gesamtbeschreibung trotz geeigneter Initialraumkonfiguration zu einer hohen Komplexität der entstehenden Gleichungen. Eine manuelle Berechnung sowie eine Darstellung der Gesamtgleichungen sind deshalb nicht zielführend. Zur Kalkulation wurde daher ein Softwaresystem zur automatisierten Berechnung der Gleichungssysteme eingesetzt [MatLab[®] (Symbolic Toolbox)]. Nachstehend wird der Lösungsweg Schritt für Schritt unter Zuhilfenahme entsprechender Substitutionsterme beschrieben. Bild 6-10 gibt einen Überblick über die einzelnen Rechenschritte.

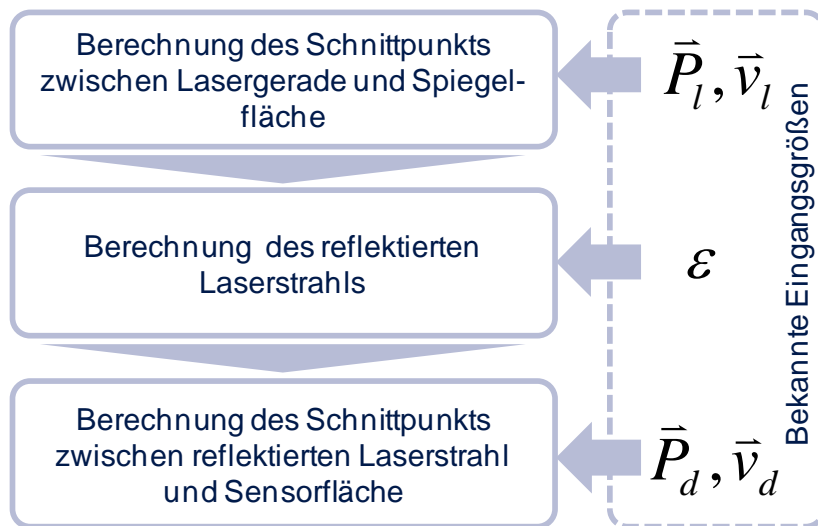


Bild 6-10: Vorgehen zur analytischen Beschreibung von \vec{P}_{LD}

Zuerst wird der Schnittpunkt zwischen Laser und Spiegel in Abhängigkeit von den Spiegelgrößen berechnet. Dieser kann dann durch die in Abschnitt 6.3.2.2 gewählte Beschreibung über die allgemeine Ebenengleichung berechnet werden (RÅDE ET AL. 2003). Als bekannte Eingangsgrößen gehen der Ursprungspunkt des Lasers und dessen Richtungsvektor in die Berechnung ein. Es ergibt sich der Zusammenhang

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

$$\begin{aligned}
 n_s^x(\theta, \varphi) * (P_l(1) + kv_l(1) - x_{P_S}) + \\
 n_s^y(\theta, \varphi) * (P_l(2) + kv_l(2) - y_{P_S}) + \\
 n_s^z(\varphi) * (P_l(3) + kv_l(3) - z_{P_S}) = 0.
 \end{aligned} \tag{6.29}$$

Die Lösung dieser Gleichung ist ein Wert $k(x_{P_S}, y_{P_S}, z_{P_S}, \theta, \varphi)$, der – eingesetzt in die Geradengleichung des Lasers – den Auftreffpunkt des Lasers auf dem Spiegel in Abhängigkeit von den Spiegelgrößen beschreibt [$\vec{P}_{LS} = f(x_{P_S}, y_{P_S}, z_{P_S}, \theta, \varphi)$].

Im nächsten Schritt wird der reflektierte Laserstrahl mithilfe des bekannten Spiegelkippwinkels ε in Abhängigkeit von den Spiegelgrößen und von dem vorher berechneten Auftreffpunkt bestimmt. Dabei wird der einfallende Laserstrahl analog zu (6.10) bis (6.15) um den Vektor senkrecht zu Spiegelnormalenvektor und Laservektor gedreht. Der Drehwinkel ergibt sich dabei aus dem Einfallswinkel ρ_e . Auf Basis der Gleichung für den reflektierten Laserstrahl $\vec{L}_r = f(x_{P_S}, y_{P_S}, z_{P_S}, \theta, \varphi, \delta, \varepsilon)$ wird abschließend dessen Schnittpunkt mit der Sensorfläche \vec{P}_{LD} bestimmt. Bei bekannter Position des Sensors erhält man dabei einen Punkt, dessen Koordinaten durch die Spiegelgrößen eindeutig definiert sind [Gleichung (6.28)]. Betrachtet man die Koordinaten des Punkts \vec{P}_{LD} einzeln, lassen sich drei wesentliche Erkenntnisse gewinnen.

- Erstens, bei der gewählten Initialraumkonfiguration entspricht die z-Koordinate des Auftreffpunkts immer der z-Koordinate des Sensormittelpunkts.
- Zweitens, die x-Koordinate ist abhängig von allen elementaren Spiegelgrößen.
- Drittens, die y-Koordinate ist für die durch (6.22) gegebene Stellung der Detektornormalen unabhängig von der Lage des Spiegelmittelpunkts P_S .

Letzteres liegt daran, dass die Richtung $\vec{v}_{lr} = \mathbf{R} * \vec{v}_l$ des reflektierten Laserstrahls nur von der Laserrichtung und der Spiegelnormale abhängt und nicht vom Mittelpunkt des Spiegels und den Koordinaten des Laserauftreffpunkts. Die y- und z-Koordinate des Auftreffpunkts des Lasers auf dem Spiegel sind durch den Strahlengang des Lasers definiert und in der gewählten Initialraumkonfiguration (6.21) stets Null. Für die Spiegelnullstellung hängt die y-Koordinate außerdem nur von der Lage des Spiegelnormalenvektors ab. Für $\varepsilon = 0$ ergibt sich die Gleichung

$$\begin{aligned}
 \vec{P}_{LD}(\varepsilon = 0) = \\
 \left(\begin{array}{c}
 x + y \tan(\theta) + \frac{30 \cos^2 \varphi \cos^2 \theta + z \cos^2 \varphi - 30 \cos^2 \theta + 15}{\cos \varphi \cos \theta \sin \varphi} \\
 -30 * \tan \varphi * \sin \theta \\
 -30
 \end{array} \right) \tag{6.30}
 \end{aligned}$$

Für Winkelstellungen außerhalb der Nulllage kann die y-Koordinate des Auftreffpunkts durch eine Gleichung beschrieben werden, die von φ , θ , δ und ε abhängt. Sie ergibt sich analog zu Gleichung (6.30). Für die x-Koordinate entsteht für $\varepsilon \neq 0$ durch

die Berücksichtigung der Spiegelstellung und der Lage der Drehachse eine Gleichung, die neben den Winkeln von Normalen- und Drehvektor des Spiegels auch von den Koordinaten des Spiegelmittelpunkts abhängt. Beide Gleichungen können durch die implementierten Rechenschritte automatisiert erstellt werden. Sie haben eine Länge von mehreren hundert Zeichen, auf ihre Darstellung wird hier deshalb verzichtet.

Die getrennte Verarbeitung von x- und y-Koordinate ermöglicht ein sequentielles Vorgehen bei der Berechnung der Spiegelposition. Zuerst werden drei Messpunkte (MP) bei den bekannten Spiegelwinkeln $-\varepsilon$, 0 und $+\varepsilon$ eingelesen. Aus den x- und y-Koordinaten der Messpunkte wird dann ein Gleichungssystem der Form

$$\begin{aligned}
 \text{I.} \quad & P_{LD}^y(\varphi, \theta, \delta) - MP^y(-\varepsilon) &= 0 \\
 \text{II.} \quad & P_{LD}^y(\varphi, \theta) - MP^y(0) &= 0 \\
 \text{III.} \quad & P_{LD}^y(\varphi, \theta, \delta) - MP^y(+\varepsilon) &= 0 \\
 \text{IV.} \quad & P_{LD}^x(x, y, z, \varphi, \theta, \delta) - MP^x(-\varepsilon) &= 0 \\
 \text{V.} \quad & P_{LD}^x(x, y, z, \varphi, \theta) - MP^x(0) &= 0 \\
 \text{VI.} \quad & P_{LD}^x(x, y, z, \varphi, \theta, \delta) - MP^x(+\varepsilon) &= 0
 \end{aligned} \tag{6.31}$$

gebildet. Hochgestellte Indizes stehen dabei für die entsprechenden Punktkoordinaten. Anhand der drei y-Koordinatenwerte (I-III) können die Winkel θ , φ und δ berechnet werden, die die Spiegelnormale und die Spiegeldrehachse festlegen. Anschließend wird mit den x-Koordinatenwerten und den drei Winkeln die Position des Spiegelmittelpunkts P_s berechnet.

6.3.2.4 Nullstellenlösung mittels Trust-Region-Verfahren

Mit dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Vorgehen erhält man ein System aus sechs Gleichungen mit sechs Unbekannten [vgl. (6.31)], dessen Nullstellenlösung die Spiegelposition eindeutig beschreibt. Aufgrund der Komplexität und Größe einzelner Gleichungen des Systems ist eine analytische Lösung nicht möglich. Es kommen deshalb numerische Verfahren zum Einsatz. Welches Verfahren sich besonders gut eignet, hängt von dessen Konvergenzverhalten und Laufzeit ab. Prinzipiell eignen sich das Newtonschen Näherungsverfahren, das Verfahren nach Levenberg & Marquardt (HANKE-BOURGEOIS 2009) und Trust-Region-Methoden (TR) (CONN ET AL. 2000) (vgl. Abschnitt 5.2) zur Nullstellenlösung des Gleichungssystems (6.31).

Newton-Verfahren und Quasi-Newton Verfahren, wie der Levenberg-Marquart-Algorithmus, haben die Eigenschaft bei Startwerten, die weit vom Optimalwert entfernt sind, zu divergieren oder sich nur langsam dem Funktionsminimum anzunähern. Darüber hinaus kann die lineare Funktionsnäherung zu Problemen führen. Ist die Jaco-

bi-Matrix eines Gleichungssystems singular, kann kein Newton-Schritt für die folgende Iteration des Abstiegsverfahrens berechnet werden. Die Verfahren werden daher für mehrdimensionale Probleme oft nur bei streng konvexen Funktionen eingesetzt (JARRE ET AL. 2004).

Im Gegensatz zu Newton-Verfahren beschreiben TR-Methoden die Lösung von Gleichungssystemen als mathematisches Minimierungsproblems und nähern dieses durch ein quadratisches Modell an. Sie sind deshalb zur Lösung des Gleichungssystems (6.31) besser geeignet. Einerseits ist die Näherung ausreichend genau, andererseits gewährleistet die Methode durch die Verwendung und dynamische Anpassung des Vertrauensbereichs Δ_k einen robusten, schnellen Lösungsalgorithmus (vgl. Abschnitt 5.2). Die Aufweitung des Vertrauensradius im Falle eines guten Werts r_k (5.8) führt zu einer schnellen Annäherung des Algorithmus an ein Optimum. Bildet die Modellfunktion den realen Funktionszusammenhang an einem Punkt nur ungenau ab, gewährleistet die Neumodellierung bei gleichzeitiger Reduktion von Δ_k im folgenden Nullschritt eine Stabilisierung des Algorithmus. Letzteres ist im Hinblick auf den praktischen Einsatz des Algorithmus wichtig, da davon ausgegangen werden kann, dass die erfassten Messwerte Kalibrierungsfehler und Messungenauigkeiten enthalten. Dies darf nicht zu einer Divergenz der Nullstellenlösung führen.

Aus diesen Gründen wird bei der Laserreflexiven Positionierung ein Trust-Region-Verfahren nach dem „Trust-Region-Dogleg“-Algorithmus angewendet (POWELL 1970). Dieser arbeitet im Wesentlichen nach dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Trust Region Verfahren. Die Besonderheit des Dogleg-Algorithmus liegt in der Bestimmung der Iterationsschrittweite d , die berechnet wird durch

$$d = d_C + \lambda(d_N - d_C) \quad (6.32)$$

mit dem Cauchy-Anteil

$$d_C \sim J(x_k)^T f(x_k) \quad (6.33)$$

und dem Newton-Schritt

$$d_N = \frac{f(x_k)}{J(x_k)} \quad (6.34)$$

Dabei entspricht $J(x_k)$ der Jakobi-Matrix der Funktion an der Stelle x_k . Der Faktor λ wird im Bereich $[0,1]$ so gewählt, dass gilt $\|d\| \leq \Delta_k$. Diese Methode zur Bestimmung von d ist im Vergleich zu anderen TR-Methoden sehr effektiv, da pro Iterationsschritt nur λ angepasst werden muss. Erst bei einem Nullschritt werden Cauchy-Anteil und Newton-Schritt neu bestimmt.

6.3.2.5 Stabilität, Genauigkeit und Laufzeit

Gezeigt werden konnte bislang, dass eine analytisch-numerische Berechnung der Spiegelposition basierend auf mindestens drei Sensorwerten für verschiedene, bekannte Spiegelwinkel ε möglich ist. Für den theoretischen Nachweis, dass der analytisch-numerische Algorithmus zur LRP auch im technischen Montageumfeld einsetzbar ist, muss noch untersucht werden, ob die Stabilität, die Berechnungsgenauigkeit und die Laufzeit des Algorithmus in zulässigen Toleranzfenstern liegen. Die Empfindlichkeit des Algorithmus gegenüber Extrem- und Randwertproblemen lässt sich durch eine Sensitivitätsanalyse prüfen (FRANK 1976). Für die statistische Abschätzung der durchschnittlichen Berechnungsgenauigkeit und Laufzeit hingegen, eignet sich die Monte-Carlo-Simulation (MCS) (ECUYER ET AL. 2009). Deshalb werden im diesem Abschnitt die Ergebnisse des Berechnungsalgorithmus für die Randwerte des Eingangsraums in einer Sensitivitätsanalyse vollfaktoriell untersucht und die Berechnungsgenauigkeit sowie die Laufzeit bei einer zufälligen Wahl der Eingangsparameter statistisch in einer Monte-Carlo-Simulation abgesichert. Für beide Analysemethoden kann das Simulationsmodell aus Abschnitt 6.2 zur Berechnung der Eingangsmuster für die Algorithmen herangezogen werden. Durch den Vergleich der in der Simulation verwendeten Eingangsparameter mit den berechneten Spiegelpositionen wird die theoretische Positioniergenauigkeit des Algorithmus ermittelt und eine automatisierte Laufzeitanalyse durchgeführt. Das in Bild 6-11 dargestellten Flussdiagramm gibt einen Überblick über den Ablauf beider Analysemethoden.

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

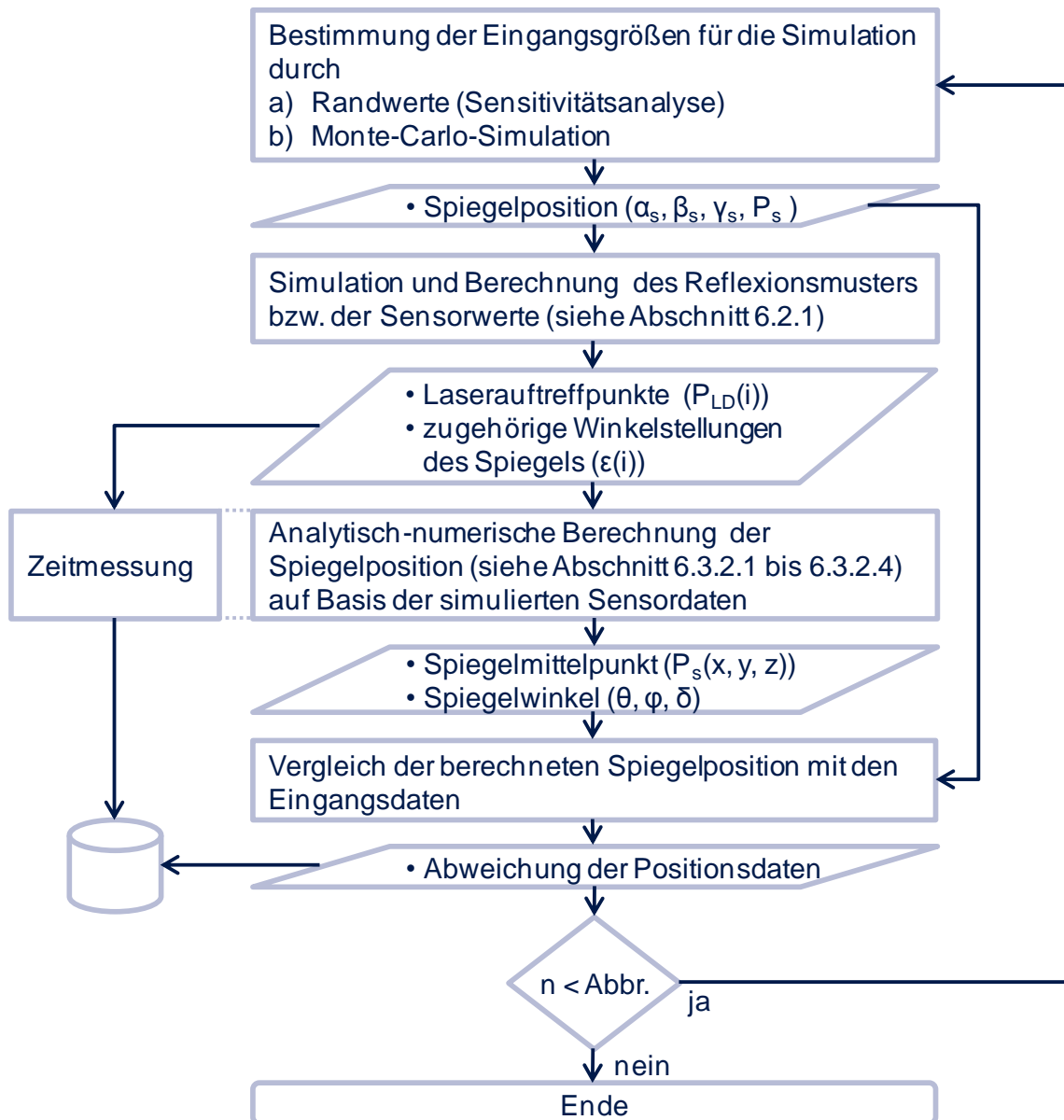


Bild 6-11: Flussdiagramm zur Stabilitäts- und Genauigkeitsanalyse

Zu Beginn der Simulation werden die Eingangsparameter festgelegt. Diese sind im Fall der Sensitivitätsanalyse die Randwerte des Eingangsraums, im Fall der Monte-Carlo-Simulation zufällig gewählte Größen innerhalb dieses Raums. Auf Basis der durch die Eingangsgrößen spezifizierten Position des Mikrospiegels werden mithilfe der Reflexionsmusterberechnung (vgl. Abschnitt 6.2.1) das zugehörige Projektionsmuster und die entsprechenden Sensorwerte berechnet. Diese simulierten Sensorwerte dienen im nächsten Schritt als Eingangsparameter für den analytisch-numerischen Algorithmus. Die durch den Algorithmus berechnete Spiegelposition kann dann mit den Eingangsparametern verglichen werden, wodurch sich die Genauigkeit und der numerische Fehler des Algorithmus bestimmen lassen. Während der Berechnung der Spiegelposition wird außerdem die Laufzeit des Algorithmus gemessen. Abhängig von der

Anzahl der simulierten Positionierungen wird dieses Vorgehen wiederholt durchlaufen.

Bei der Sensitivitätsanalyse werden die Extremwerte des Eingangsraums vollfaktoriell untersucht (Bild 6-11, unter a). Als Eingangsgrößen dienen die Randwerte der groben Vorpositionierung des Mikrospiegels durch das Montagesystem. Vor der Laserreflexiven Positionierung muss der Spiegel durch die Montagekinematik in den Einflussbereich des Lasers gebracht und so ausgerichtet werden, dass der reflektierte Laserstrahl auf den Sensor trifft (vgl. Abschnitt 6.1). Bei dieser Vorpositionierung fährt das Montagesystem eine eingelernte Optimalposition des Spiegels an. Die maximalen Abweichungen der erreichten Position entsprechen dann der Summe der Genauigkeitstoleranzen der eingesetzten Kinematik und der verwendeten Endeffektoren. Analog zu den technischen Spezifikationen gängiger, einfacher und günstiger Mikromontagesysteme (vgl. Abschnitt 2.2) können für die Randwerte der Spiegelposition die in Tabelle 6-5 spezifizierten Werte angenommen werden. Sie entsprechen einer Absolutgenauigkeit von $\pm 0,5$ mm bzw. $\pm 1^\circ$ in allen Achsen des Montagesystems.

Eingangsgröße	Minimalwert	Maximalwert
$x = P_s(1)$	$x_{\min} = x_{\text{opt}} - 0,5 \text{ mm}$	$x_{\max} = x_{\text{opt}} + 0,5 \text{ mm}$
$y = P_s(2)$	$y_{\min} = y_{\text{opt}} - 0,5 \text{ mm}$	$y_{\max} = y_{\text{opt}} + 0,5 \text{ mm}$
$z = P_s(3)$	$z_{\min} = z_{\text{opt}} - 0,5 \text{ mm}$	$z_{\max} = z_{\text{opt}} + 0,5 \text{ mm}$
α_s	$\alpha_{s-\min} = \alpha_{s-\text{opt}} - 1^\circ$	$\alpha_{s-\max} = \alpha_{s-\text{opt}} + 1^\circ$
β_s	$\beta_{s-\min} = \beta_{s-\text{opt}} - 1^\circ$	$\beta_{s-\max} = \beta_{s-\text{opt}} + 1^\circ$
γ_s	$\gamma_{s-\min} = \gamma_{s-\text{opt}} - 1^\circ$	$\gamma_{s-\max} = \gamma_{s-\text{opt}} + 1^\circ$

Tabelle 6-5: Randwerte für die Genauigkeitsanalyse

Die vollständige Sensitivitätsanalyse der Randwerte umfasst $2^6 = 64$ Permutationen der Eingangswerte. Im Mittel ergeben sich für die einzelnen Abweichungen der berechneten Spiegelparameter die in Bild 6-12 zusammengefassten Werte $\Delta\varphi$, $\Delta\delta$ und $|\vec{l}_{DA}|$. Der Spiegelwinkel θ wurde für alle Parameterkombinationen der Sensitivitätsanalyse exakt mit einer Winkelabweichung von $\Delta\theta = 0$ berechnet. Bild 6-12 zeigt deshalb nur die statistische Auswertung der Winkelabweichungen in φ und δ sowie des Positionsfehlers.

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

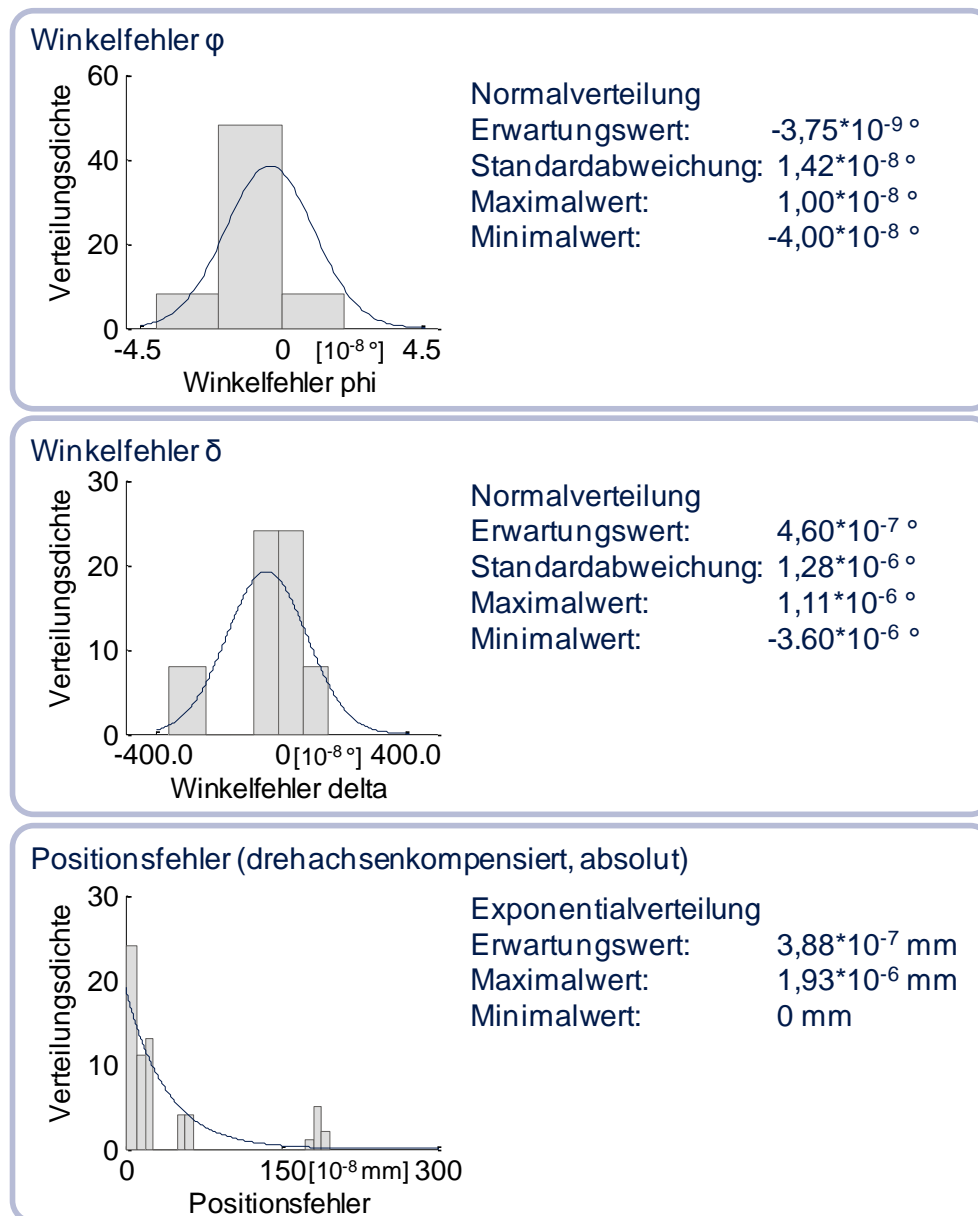


Bild 6-12: Abweichung der Spiegelpositionsparameter bei der Sensitivitätsanalyse

Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der analytisch-numerische Algorithmus selbst bei hohen Abweichungen der Spiegelposition von ihrem Optimalwert eine sehr genaue Bestimmung der Positionsparameter gewährleistet. Die maximale Winkelabweichung liegt im Bereich von 10^{-6} ° (Winkel δ), der größte absolute Fehler der Mittelpunktposition bezüglich der Drehachse beträgt $\Delta_{max}(xyz)_{DK} = 1,9 \cdot 10^{-9} \text{ mm}$. Dies liegt weit unterhalb der geforderten Genauigkeit von $0,01 \text{ }^\circ$ bei $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ (vgl. Abschnitt 6.1.1). Betrachtet man die Positionsabweichungen in Abhängigkeit von der Permutation der Eingangsparameter, lässt sich feststellen, dass der Algorithmus sensibel auf eine Erhöhung des Winkels α bei gleichzeitiger Verringerung des Winkels γ reagiert. Im Wertebereich für $\alpha = \alpha_{s-max}$ und $\gamma = \gamma_{s-min}$ sind über alle Winkel und die Mittelpunktposition die größten Berechnungsabweichungen zu beobachten.

Die durchschnittliche Berechnungszeit über alle Permutationen liegt bei 3,03 Sekunden.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt prinzipiell die Eignung des analytisch-numerischen Algorithmus für die Laserreflexive Positionierung sowie dessen Stabilität im Randbereich des Eingangsraums. Zur statistischen Absicherung der Berechnungsgenauigkeit wird in einer Monte-Carlo-Simulation die Stabilität und Genauigkeit des analytisch-numerischen Algorithmus bei einer zufälligen Wahl der Eingangsparameter innerhalb eines realistischen Werteraums analysiert (Bild 6-11, Fall b). Als Werteraum für die Eingangsparameter werden die Bereiche innerhalb der in Tabelle 6-5 spezifizierten Grenzwerte angenommen. Zur Berechnung einer statistisch relevanten Datenmenge werden 10.000 Berechnungsvorgänge mit zufällig gewählten, normalverteilten Eingangsgrößen durchgeführt. Über die komplette Stichprobenmenge werden die Berechnungsgenauigkeiten der Winkel θ , φ und δ sowie des drehachsenkompensierten Positionsfehlers ermittelt (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Bei der hier durchgeführten Genauigkeitsabschätzung handelt es sich um ein stochastisches Experiment mit begrenzter Stichprobengröße. Deshalb muss für alle Ergebnisse ein Konfidenzintervall mit einer zugehörigen Fehlerwahrscheinlichkeit angegeben werden. Um eine sehr genaue Abschätzung des Konfidenzintervalls $I_K = [\underline{\lambda}, \bar{\lambda}]$ der zu untersuchenden Größen zu erhalten, wird eine Fehlerwahrscheinlichkeit für das Ergebnis von $P_f = 0.5 \%$ vorausgesetzt. Damit gilt bei einer Stichprobenanzahl von $n = 10.000$:

$$P\left(\underline{\lambda}(X) \leq \zeta \leq \bar{\lambda}(X)\right) = 1 - P_f \quad (6.35)$$

Wobei ζ für die zu untersuchende Größe steht und X für den stichprobenabhängigen Vektor $X = (X_1, \dots, X_n)$ (KOLONKO 2008). Dies bedeutet, dass 99,5 % aller tatsächlichen Werte innerhalb des in der Stichprobe ermittelten Konfidenzintervalls liegen. Das Konfidenzintervall kann mithilfe der folgenden Gleichungen bestimmt werden.

$$\underline{\lambda}_n(X_{(n)}) := \bar{X}_n - Q_{\frac{P_f}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad \bar{\lambda}_n(X_{(n)}) := \bar{X}_n + Q_{\frac{P_f}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6.36)$$

$Q_{\frac{P_f}{2}}$ bezeichnet dabei das $\frac{P_f}{2}$ -Quantil der Stichprobenverteilung. Es ist definiert als $Q_\psi = F^{-1}(1 - \psi)$ und entspricht der inversen Verteilungsfunktion F . Das Quantil lässt sich aus der Taylorreihenentwicklung der Dichtefunktion der Verteilung ableiten. Es kann tabellarischen Standardwerken der Mathematik entnommen oder im Fall einer ausreichend großen Stichprobe durch Wertesortierung aus der Stichprobe selbst ermittelt werden (RÅDE ET AL. 2003). Für den hier gewählten Wert von $P_f = 0,5 \%$ ergibt sich für die Standardnormalverteilung $N(0,1)$ ein Quantil von

$$Q_{0,0025} = 2,795 \quad (6.37)$$

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

Für die Abweichungen der berechneten Positionswerte von den tatsächlichen Eingangswerten der Simulation über alle 10.000 Positionierungen ließen sich die in Bild 6-13 dargestellten Werte und Verteilungen ermitteln.

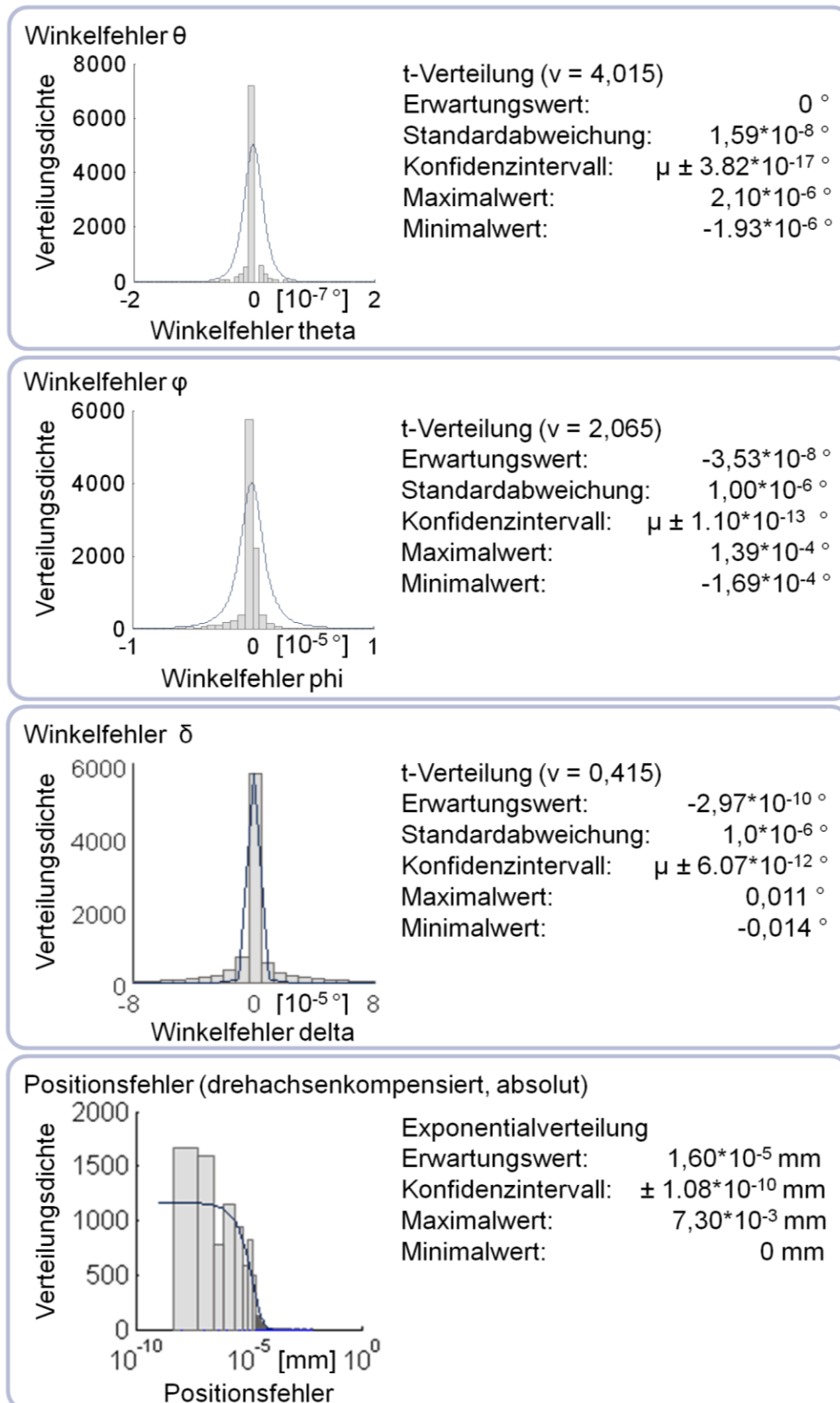


Bild 6-13: Fehlerverteilungen des analytisch-numerischen Algorithmus

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zeigen theoretisch, dass der analytisch-numerische Algorithmus die Anforderungen für die Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten erfüllt. Alle statistisch ermittelten Fehler liegen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,5% innerhalb der Konfidenzintervalle

- $-3,8 \cdot 10^{-17} \text{ }^\circ < \Delta\theta < 3,8 \cdot 10^{-17} \text{ }^\circ$,
- $-3,5 \cdot 10^{-8} \text{ }^\circ - 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ }^\circ < \Delta\varphi < -3,5 \cdot 10^{-8} \text{ }^\circ + 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ }^\circ$,
- $-3,0 \cdot 10^{-10} \text{ }^\circ - 6,1 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ < \Delta\delta < -3,0 \cdot 10^{-10} \text{ }^\circ + 6,1 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ$ und
- $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ m} - 5,0 \cdot 10^{-11} \text{ m} < |\Delta_{\text{DKPs}}| < 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ m} + 5,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Diese Werte sind weit unterhalb der geforderten Positioniergenauigkeiten von $0,01 \text{ }^\circ$ für alle Winkel und $5 \text{ } \mu\text{m}$ für den funktionsrelevanten Mittelpunktfehler (vgl. Abschnitt 6.1.1). Selbst die größten über alle 10.000 Positionsberechnungen aufgetretenen Abweichungen befinden sich mit $\Delta\theta_{\text{max}} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ$, $\Delta\varphi_{\text{max}} = -3,3 \cdot 10^{-8} \text{ }^\circ$, $\Delta\delta_{\text{max}} = 0,01 \text{ }^\circ$ und $|\Delta_{\text{DKPs}}|_{\text{max}} = 7,3 \text{ } \mu\text{m}$ innerhalb eines noch tolerierbaren Bereichs. Die durchschnittliche zur Berechnung einer Bauteilposition benötigte Laufzeit wurde über einen separaten Simulationslauf mit 1.000 simulierten Positionen aufgezeichnet. Auf dem zur Simulation genutzten Computersystem liegt diese bei 4,01 Sekunden pro Positionsberechnung und ist damit unter entsprechenden Taktzeiteinschränkungen für einen Einsatz im industriellen Umfeld geeignet.

Bei der zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation fällt auf, dass die berechneten Werte der Spiegelwinkel deutlich genauer sind als die Werte der translatorischen Freiheitsgrade. Dies liegt erstens am sequentiellen Vorgehen des analytisch-numerischen Algorithmus, der zur Berechnung der translatorischen Freiheitsgrade die berechneten Spiegelwinkel nutzt. Dadurch beeinflussen Fehler bei der Winkelberechnung die Genauigkeit der translatorischen Freiheitsgrade. Zweitens haben die Winkel der Spiegelposition durch die geometrischen Randbedingungen einen stärkeren Einfluss auf die Ausprägung des Reflexionsmusters als die Koordinaten des Spiegelmittelpunkts (vgl. Abschnitt 6.2). Dies führt, wie auch in der Sensitivitätsanalyse deutlich wird, zu einer höheren Empfindlichkeit des Algorithmus gegenüber Abweichungen der Spiegelwinkel. Bei der Nullstellenlösung des Gleichungssystems (6.31) müssen die Winkel zur Erreichung des numerischen Abbruchkriteriums deshalb näher an deren Optimum liegen als die translatorischen Freiheitsgrade.

Bei den zugrunde liegenden Sensordaten handelt es sich um theoretische, optimale Werte, die basierend auf der geometrischen Optik simuliert werden. Messungenauigkeiten oder Einflüsse einer fehlerhaften Kalibrierung sind in den Ergebnissen nicht abgebildet. Die Validierung der hier vorgestellten Methode an einem Anwendungsbeispiel im Versuch folgt in Kapitel 7.

6.3.3 Lösung auf Basis genetischer Optimierung

6.3.3.1 Vorteile genetischer Optimierung

Alternativ zu einer analytischen Übertragungsfunktion kann ein technisches Problem durch die Anwendung empirischer Verfahren oder durch eine zufallsbasierte Parameteroptimierung gelöst werden. Eine analytische Übertragungsfunktion beschreibt ein Problem mathematisch eindeutig und stellt, wie bereits in Abschnitt 6.3.2.1 beschrieben, die im ingenieurwissenschaftlichen Sinne optimale Lösung dar. Trotzdem sind unter bestimmten Randbedingungen alternativer Lösungsstrategien sinnvoll. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine hohe Komplexität eines mathematischen Problems oder eine sehr große Anzahl von Einflussgrößen eine analytische Beschreibung verhindern. Auch der Einfluss nicht messbarer Größen kann für den Einsatz empirischer oder optimierungsgestützter Methoden sprechen.

Evolutionäre Algorithmen sollten nicht eingesetzt werden, wenn ein spezielles Lösungsverfahren bekannt oder die Berechnung der Zielfunktion sehr aufwendig ist. In diesen Fällen arbeiten evolutionäre Strategien sehr langsam. Insbesondere werden sie bei komplexen Zielfunktionen durch die große Anzahl an Zielfunktionsberechnungen, die durchgeführt werden müssen, gebremst (POHLHEIM 2000).

Im Fall der laserreflexionsbasierten Bauteillagebestimmung stellt neben dem analytisch-numerischen Algorithmus (vgl. Abschnitt 6.3.2) der Einsatz eines evolutionären Optimierungsverfahrens eine zweite Möglichkeit dar, die Spiegelposition zu bestimmen. Im Unterschied zu traditionellen Algorithmen werden für die Lösung eines Problems durch evolutionären Verfahren weder eine Übertragungsfunktion noch ein empirisches Modell benötigt, sondern lediglich die Zielfunktion. Letztere dient ausschließlich zur Bewertung der Güte einer Lösung und kann oft deutlich einfacher als das Problem selbst beschrieben werden (POHLHEIM 2000). So lässt sich die Spiegelposition bei der LRP auch bestimmen, wenn aus systemtechnischen Gründen die in Abschnitt 6.3.2.2 entwickelte Initialraumkonfiguration in einer Montageanlage nicht abgebildet werden kann. Ein weiterer Vorteil von genetischen Optimierungsmethoden ist ihr Potenzial die Position eines Spiegels ohne Modellierung des Montagesystems zu bestimmen. Dadurch kann die LRP auch ohne genaue Kenntnis des Laserursprungs und der Sensorlage angewandt werden. Weiterhin sprechen die Nichtlinearität der Musterdaten, der beschränkte Suchraum sowie die hohe Komplexität der Übertragungsfunktion für den Einsatz evolutionärer Algorithmen in der LRP. Im Sinne einer wissenschaftlichen Betrachtung der Montagestrategie wird deshalb in den folgenden Abschnitten ein genetischer Optimierungsalgorithmus als alternative Lösungsmöglichkeit entwickelt und vorgestellt.

Eine der Herausforderungen bei der Entwicklung eines genetischen Optimierungsalgorithmus ist die Identifikation eines geeigneten Evolutionsverfahrens (vgl. Abschnitt 5.3). Abhängig von den Rahmenbedingungen des zu lösenden technischen Problems können unterschiedliche Verfahren zum Erfolg führen. WEICKER (2007) stellt in seinen Arbeiten einen analysebasierten Ansatz zur Strategiewahl vor. Er entwickelt ein strukturiertes Vorgehen mit dessen Hilfe genetischen Entwicklungs- bzw. Programmierungsstrategien (vgl. Abschnitt 5.3) identifiziert werden können, die auf ein konkretes technisches Problem anwendbar sind. Im Folgenden wird daher zuerst eine Evolutionsstrategie ausgewählt und anschließend ein Algorithmus für die laserreflexionsbasierte Bauteillagebestimmung auf Basis des ausgewählten Optimierungsverfahrens entwickelt.

6.3.3.2 Auswahl des Optimierungsverfahrens

Die Auswahl eines für die Laserreflexive Positionierung geeigneten Konzepts evolutionärer Algorithmen folgt dem von WEICKER (2007) entwickelten generischen analysebasierten Ansatz. Zunächst werden die Arbeitsschritte, die der Ansatz erfordert, kurz erläutert und anschließend direkt auf die für die Laserreflexive Positionierung geltenden Randbedingungen übertragen. Bild 6-14 gibt einen Überblick über das Vorgehen.

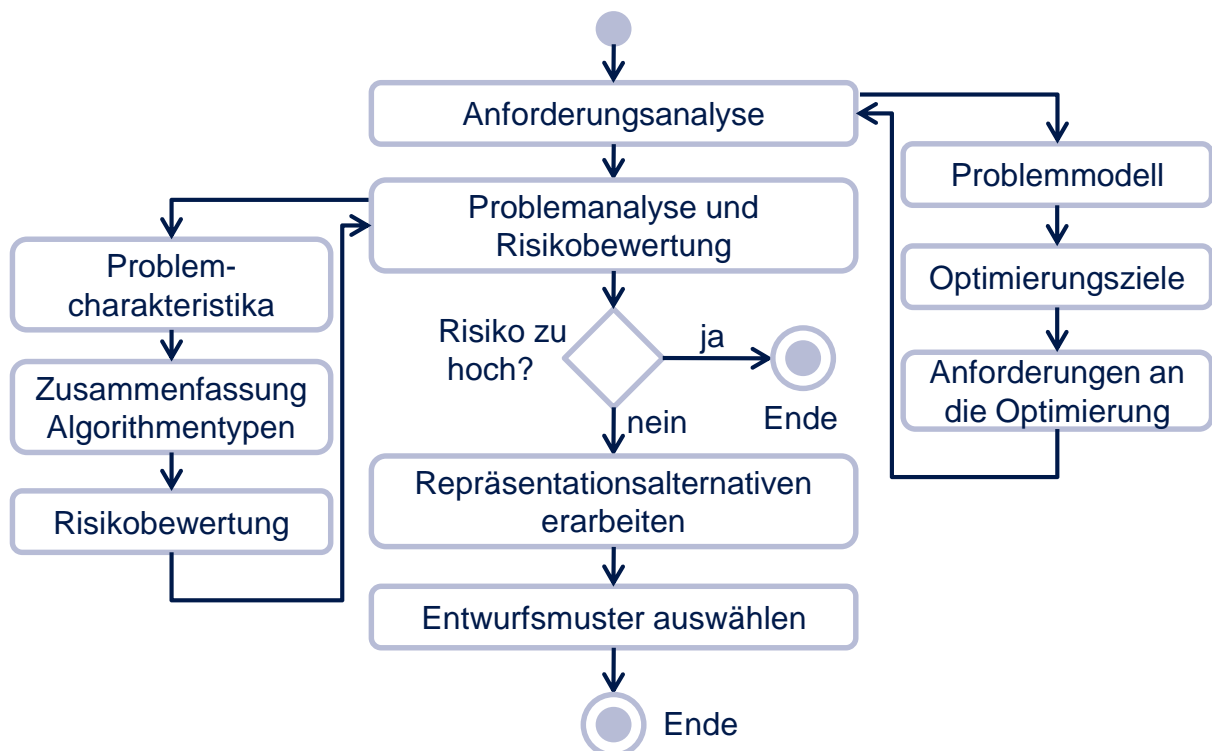


Bild 6-14: Analysebasierter Ansatz zum Entwurf evolutionärer Algorithmen in Anlehnung an WEICKER (2007)

Anforderungsanalyse

Im ersten Schritt des analysebasierten Ansatzes ist eine Anforderungsanalyse durchzuführen. Zu untersuchen sind das Problem, die Ziele der Optimierung sowie die genauen Anforderungen an die Optimierung. Dazu wird zuerst ein Problemmodell erstellt, dann werden die Optimierungsziele spezifiziert und anschließend die Anforderungen an die Optimierung abgeleitet (Bild 6-15).

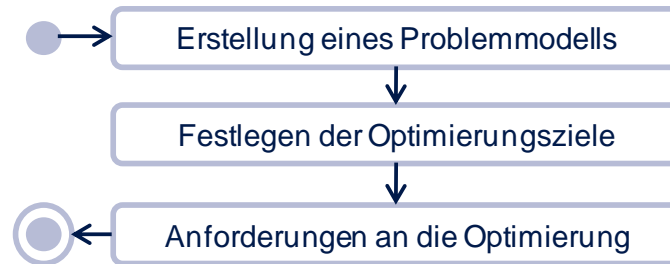


Bild 6-15: Anforderungsanalyse nach dem analysebasierten Ansatz (WEICKER 2007)

Bei der *Erstellung des Problemmodells* wird zunächst geklärt, in welchem Suchraum sich der Algorithmus bewegen muss, also welche Größen verändert werden können und müssen, und in welchen Bereichen dies geschehen soll.

Im zu untersuchenden Fall der Bauteilpositionierung umfasst der Suchraum die Position und die Ausrichtung des Spiegels, also die Raumkoordinaten und Drehwinkel. In der praktischen Anwendung lassen sich die Raumkoordinaten durch eine grobe Vorpositionierung der Montagekinematik auf $\pm 0,5$ mm und die Winkel auf $\pm 1^\circ$ vorgeben (vgl. Abschnitt 2.2). Der Suchraum liegt deshalb innerhalb dieser Grenzen um die Ausgangslage und entspricht den in Tabelle 6-5 spezifizierten Wertebereichen.

Nach der Erstellung des Problemmodells folgt die *Festlegung der Optimierungsziele*. Hier werden Bewertungskriterien für die Güte einer Lösung definiert, die sich als mathematische Optimierungsprobleme formulieren lassen. Die Optimierungsziele müssen dabei als Minimierungs- oder Maximierungsproblem der Form $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ formuliert werden. Die Reduktion der Positionsinformation des Spiegels in sechs räumlichen Freiheitsgraden ($x_s, y_s, z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s$) auf das zweidimensionale Sensormuster entspricht bereits einer Funktion der Art $F: \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^2$ (vgl. Abschnitt 6.2.1). Zusätzlich wird nun noch eine Funktion $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ benötigt, die die Koordinaten der Auftreffpunkte auf dem Sensor auf einen reellen Zahlenwert reduziert. Da es sich um ein Extremwertproblem handelt, dessen Zielgröße durch den Algorithmus minimiert wird, muss dieser Zahlenwert repräsentativ für die Abweichung einer Position von der optimalen Spiegelposition sein. Es bietet sich daher an, $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ als Abstandsfunktion des erzeugten Musters vom theoretisch optimalen Muster zu beschreiben. Dies ist durch den Vergleich mehrerer Stütz- oder Messpunkte innerhalb eines Musters mit den äquivalenten Stützpunkten des Optimalmusters und durch die Berechnung der quadratischen Abstände zu erreichen. Die Summe der Abstände ist eine reelle Zahl, deren quadrati-

sche Minimierung einer Annäherung des Musters an das Optimalmuster entspricht. Bild 6-16 zeigt beispielhaft ein Sensorbild für eine quadratische Näherungsfunktion mit 21 Musterstützpunkten. Der berechnete Wert kann als Fitnesswert F eines Musters bzw. einer Spiegelposition verstanden werden (vgl. Abschnitt 5.3). Er ist definiert durch

$$F = \sum_{\varepsilon=\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} ((x_{Optimalwert,\varepsilon} - x_{\varepsilon})^2 + (y_{Optimalwert,\varepsilon} - y_{\varepsilon})^2) = \sum_{i=1}^{21} d_i^2 \quad (6.38)$$

Der Winkel ε steht dabei für den zu einem Musterpunkt gehörenden Drehwinkel der Spiegelkinematik.

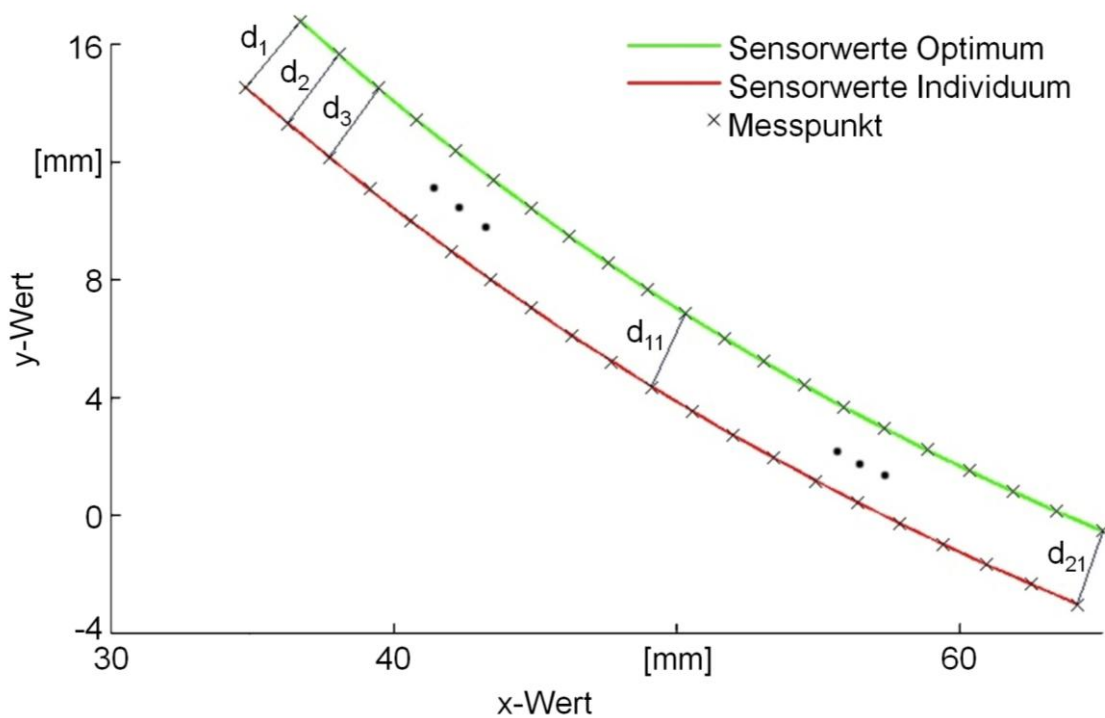


Bild 6-16: Fitnessbewertung durch quadratische Abstände der Musterstützpunkte

Zur Festlegung der Optimierungsziele gehört außerdem die Definition eines Abbruchkriteriums, das angibt, wann diese als erreicht gelten. Definiert man hierfür die Unterschreitung eines bestimmten Fitnesswerts, kann durch diesen Grenzwert eine Genauigkeit vorgegeben werden, mit der das Reflexionsmuster dem Optimalmuster entspricht. Damit wird indirekt eine maximale Abweichung der Spiegelposition von der optimalen Montageposition festgelegt.

Für die theoretische Entwicklung des evolutionären Algorithmus wird eine maximal zulässige Abweichung aller Spiegelparameter um 10^{-5}° für den Drehwinkel und $10^{-2} \mu\text{m}$ für die translatorischen Freiheitsgrade angenommen. Der größte Fitnesswert, der dieser Genauigkeit entspricht, ist ein Wert von $F \leq 10^{-9} \text{ mm}^2$. Bei diesem Wert ist der maximale Fehler eines Punktes auf dem Sensor gleich $\sqrt{10^{-9}} \text{ mm} \approx 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

und der durchschnittliche Fehler aller 21 Messpunkte gleich $\sqrt{10^{-9}/21} \text{ mm} \approx 6,90 * 10^{-6} \text{ mm}$.

Bei der Bestimmung der *Anforderungen an die Optimierung* werden die äußeren Rahmenbedingungen erfasst, die nicht unmittelbar mit dem Optimierungsverfahren im Zusammenhang stehen. Fragen, die in dieser Hinsicht geklärt werden müssen, sind: Wie häufig soll der Algorithmus angewendet werden? Welche Qualitätserwartungen werden an die Lösung gestellt? Gibt es Rechenzeit- und Speicherbeschränkungen? Wann wird das Ergebnis der Optimierung benötigt? Für die durchzuführende Untersuchung gilt: Der Algorithmus soll beliebig oft angewendet werden, Rechenzeit- und Speicherbeschränkungen gibt es nur indirekt durch die Taktzeiten. Als Qualitätserwartung kann die Positioniergenauigkeit des Spiegels angegeben werden. Die Winkel sollen auf $\pm 10^{-1} \text{ }^\circ$ und die Position auf $\pm 5\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$ genau an der Optimalposition des Spiegels liegen. Die Ergebnisse werden erst am Ende der Optimierung benötigt.

Problemanalyse und Risikobewertung

Auf die Anforderungsanalyse folgt die Problemanalyse und Risikobewertung, in der ein Überblick über die Optimierungsmöglichkeiten gegeben und das Erfolgsrisiko des Vorgehens abgeschätzt wird. In Anlehnung an WEICKER (2007) können dafür die in Bild 6-17 dargestellten Teilschritte definiert werden.

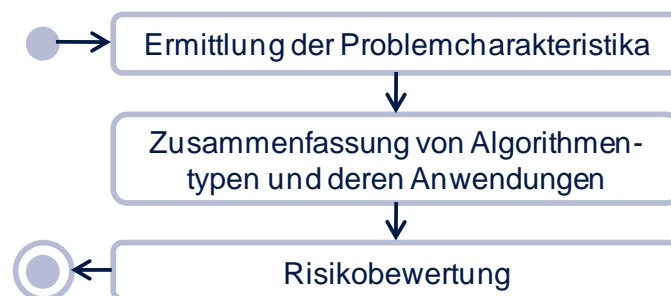


Bild 6-17: Problemanalyse und Risikobewertung nach dem analysebasierten Ansatz in Anlehnung an WEICKER (2007)

Bei der *Ermittlung der Problemcharakteristika* wird zunächst geprüft, ob das Problem auch mit klassischen Verfahren gelöst werden kann. Im vorliegenden Fall ist eine analytisch-numerische Lösung des Problems möglich (vgl. Abschnitt 6.3.2). Allerdings müssen dafür Position und Orientierung von Laser und PSD-Sensor durch eine genaue Vermessung des Sensorsystems bestimmt werden. Der Einsatz der Laserreflexiven Positionierung ist damit auf Mikro- und Hochpräzisionsanwendungen beschränkt. Evolutionäre Algorithmen bieten das Potenzial, eine Positionierung ohne Vermessung der Montageanlage vorzunehmen, und können so das Einsatzspektrum der Sensortechnologie erweitern.

Bei der *Zusammenfassung von Algorithmotypen und deren Anwendung* werden die zur Lösung des Problems potenziell geeigneten Methoden der genetischen Optimierung gesammelt und gegenübergestellt. Außerdem wird geprüft, ob ein ähnliches Problem bereits mit einem evolutionären Algorithmus gelöst wurde und falls ja, mit welcher Variante. Die genaue Betrachtung vorhandener Systeme zur Positionierung optischer Mikrokomponenten zeigt (vgl. Kapitel 2), dass kein vergleichbares Positionierungsproblem bisher mit einem genetischen Verfahren gelöst wurde.

Bei einer Gegenüberstellung der in Abschnitt 5.3 vorgestellten genetischen Optimierungsmethoden werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Strategien sehr deutlich. Bei den Genetischen Algorithmen (GA) ist das Individuum in codierter Form gespeichert, eine Decodierung der Individuen ist zu ihrer Bewertung immer nötig. Die Individuen der Genetischen Programmierung (GP) dagegen sind als Programme gespeichert, die zur Bewertung ihrer Fitness ausgeführt werden müssen. Bei der Evolutionsstrategie (ES) und der Evolutionären Programmierung (EP) bestehen die Individuen aus reellwertigen Parametern. Die Lösungsbewertung erfolgt durch eine Zielfunktion, die von den Parametern der Individuen abhängt. Auch in der Populationsgröße unterscheiden sich die verschiedenen Konzepte. Bei den GA und der GP bleiben die Populationen konstant. Neben der alten Population wird eine neue Population erstellt. Sobald die neue Population vollständig ist, wird die alte verworfen. Bei den ES dagegen alterniert die Populationsgröße zwischen μ und λ ((μ, λ) -Selektion) oder μ und $\mu+\lambda$ ($(\mu+\lambda)$ -Selektion) und bei der EP wechselt die Populationsgröße zwischen μ und $2*\mu$.

Weitere wesentliche Unterschiede ergeben sich bei der Mutation und Rekombination. Bei den auf der phänotypischen Ebene arbeitenden Verfahren (ES und EP) werden normalverteilte Mutationen verwendet. Dies geschieht analog zur biologischen Evolution, da auch dort kleine, weniger starke Mutationen sehr viel häufiger vorkommen als große. Genetische Algorithmen (GA) arbeiten dagegen mit stärkeren Mutationen, die mit einer geringen Wahrscheinlichkeit eintreten. Folglich spielen bei den GA Mutationen eine untergeordnete Rolle. Die Hauptsuche erfolgt bei diesem Verfahren über die Rekombination verschiedener Individuen. Die GP verzichtet vollständig auf die Mutation.

Auch die Rekombination läuft in den verschiedenen Verfahren unterschiedlich ab. Bei den GA werden die Werte der Individuen auf Bit-Ebene rekombiniert, bei der GP werden einzelne Programmteile vertauscht und bei den ES kann die Rekombination auf zwei verschiedene Arten, intermediär oder diskret, erfolgen. Alle drei Verfahren haben jedoch gemeinsam, dass immer ein Kompromiss zwischen zwei Individuen gebildet wird. Bei der EP erfolgt überhaupt keine Rekombination.

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

Die Selektion der Eltern erfolgt bei der ES und der EP diskriminierend, bei den GA und der GP dagegen nicht diskriminierend. Im Fall des GA und der GP bleibt die Populationsgröße konstant, es „überleben“ alle erzeugten Nachkommen. Bei der ES und der EP dagegen „überlebt“ nur ein Teil der erzeugten Nachkommen, diejenigen mit schlechten Fitnesswerten werden verworfen. Aus diesem Grund können sich Individuen mit schlechten Fitnesswerten nicht fortpflanzen.

Ein weiterer Unterschied der Konzepte liegt in der Anpassung der Mutation, der Selbstadaptivität. Bei der ES wird die Selbstadaptivität über die Mutationsschrittweiten gesteuert. Je besser die Individuen werden, desto kleiner werden die Schrittweiten und desto geringer die Mutationen. Ähnlich wird bei der EP vorgegangen, die Anpassung der Mutation erfolgt über den Fitnesswert. Bei den GA wird auf die Selbstadaptivität verzichtet, bei der GP ist sie aufgrund der fehlenden Mutation nicht möglich. Tabelle 6-6 fasst die Unterschiede der vier Hauptformen evolutionärer Algorithmen zusammen.

Kriterium	GA	GP	ES	EP
Lösungsrepräsentation	binär	lauffähiges Programm	reell	reell
Fitnessmaß	binär oder reell (Decodier- und Zielfunktion)	reell (Erfolgsquote)	reell (Zielfunktion)	reell (Zielfunktion)
Selektion	stochastisch, nicht diskriminierend	stochastisch, nicht diskriminierend	deterministisch, diskriminierend	stochastisch, diskriminierend
Mutation	Nebenoperator	Nicht verwendet	Hauptoperator	Hauptoperator
Rekombination	Hauptoperator	Hauptoperator	Nebenoperator	Nicht verwendet
Selbstadaptivität	keine Selbstadaptivität	keine Selbstadaptivität	Mutations-schrittweite	Mutations-schrittweite

Tabelle 6-6: Methodische Unterschiede evolutionärer Hauptformen

Aufbauend auf dem Vergleich der Strategien genetischer Optimierung und ihrer Eigenschaften lässt sich durch die *Risikobewertung* abschätzen, wie hoch die Erfolgsaussichten zur Lösung des Problems mittels eines genetischen Verfahrens sind. Dabei wird zuerst eine Aussage über die Schwierigkeit des Problems getroffen und anschlie-

ßend geklärt, ob das Szenario mit einem evolutionären Algorithmus sinnvoll bearbeitet werden kann. Prinzipiell können evolutionäre Algorithmen auf alle Probleme angewendet werden, allerdings bieten sie keinen Ersatz für klassische Lösungsverfahren. Besonders gut eignen sie sich für

- stark nichtlineare, multimodale oder diskontinuierliche Zielfunktionen,
- hochdimensionale Suchräume,
- dynamische Umgebungen mit wandernden Optima und
- Optimierungsprobleme mit stochastischen Einflüssen.

Die Berechnung der Zielfunktion, also des Fitnesswerts aus den Eingangsgrößen [Gleichung (6.38)], ist nicht sehr aufwendig. Die vielen Berechnungen des Fitnesswerts, die im Rahmen einer evolutionären Optimierung nötig sind, stellen daher kein Problem dar. Insgesamt ist das Risiko, dass durch den evolutionären Algorithmus keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden kann, als gering einzustufen.

Erarbeitung von Repräsentationsalternativen

Der dritte Schritt zur Auswahl des genetischen Verfahrens konzentriert sich auf die Erarbeitung von Repräsentationsalternativen, insbesondere auf die Darstellung der Lösung. Um eine gute Anschaulichkeit zu gewährleisten, sollte diese möglichst nahe am Phänotyp liegen, d.h. am tatsächlichen Verhalten der Lösung (WEICKER 2007).

Aufgrund der bereits teilweise implementierten Zielfunktion ist die Repräsentation der Lösung durch die Eingangsgrößen dieser Funktion, also die Koordinaten und die Winkel des Spiegels, bereits vorgegeben. Alle Eigenschaften der Lösung können durch die sechs reellwertigen, unabhängigen Freiheitsgrade des Spiegels anschaulich und eindeutig beschrieben werden. Weiterhin entspricht die Repräsentation der Lösung durch diese sechs Freiheitsgrade genau dem Phänotyp des Spiegels, weshalb sich die Erarbeitung weiterer Alternativen erübrigt.

Entwurfsmuster auswählen

Für alle erarbeiteten Repräsentationsalternativen muss abschließend ein Evolutionsprinzip ausgewählt werden. Weil jedoch im vorliegenden Fall nur eine Art der Lösungsrepräsentation existiert, reduziert sich die Anzahl der Entwurfsmuster auf eines. Die Auswahl des Entwurfsmusters erfolgt aus den in Abschnitt 5.3 vorgestellten Konzepten evolutionärer Algorithmen. Die zur Auswahl stehenden Konzepte sind die Genetischen Algorithmen (GA), die Genetische Programmierung (GP), die Evolutionsstrategie (ES) sowie die Evolutionäre Programmierung (EP).

Genetische Algorithmen arbeiten mit binär codierten Lösungen und die Genetische Programmierung mit Lösungen in Programmform. Aufgrund der vorhandenen reellen Lösungsrepräsentation sind diese beiden Konzepte für die vorliegende Problemstel-

lung nicht geeignet. Die Auswahl beschränkt sich folglich auf die ES und die EP. Prinzipiell können beide Algorithmientypen zur Laserreflexiven Positionierung eingesetzt werden. Allerdings bildet die Evolutionäre Programmierung neue Individuen ausschließlich durch die zufällige Mutation der Elternpopulation und verzichtet auf eine Rekombination der Eltern. Dies entspricht der Auffassung der Mitglieder einer Population als Stellvertreter verschiedener Spezies, nicht als verschiedene Individuen einer einzigen Spezies. Das führt dazu, dass die Lösungskonvergenz bei der EP stärker von stochastischen Einflüssen abhängt als bei der ES (POHLHEIM 2000).

Bei der LRP repräsentieren die Individuen einzelne Spiegelpositionen und sind sich damit sehr ähnlich. Dies entspricht eher der Auffassung der Spiegelpositionen als Individuen einer Spezies. Auch führt eine intermediäre Rekombination zu einem Individuum, das in jedem Fall eine bessere Fitness aufweist als das schlechtere der beiden Eltern. Bezogen auf ihre Randwerte bzw. ihre schlechtesten Individuen konvergiert eine Population über mehrere Generationen schneller als bei einer reinen Mutation. Im Folgenden wird deshalb ein evolutionärer Algorithmus auf Basis der Evolutionsstrategie (ES) entwickelt.

6.3.3.3 Algorithmus

Der evolutionäre Algorithmus zur laserbasierten Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten folgt im Wesentlichen dem in Abschnitt 5.3.5 vorgestellten Schema. Der Aufbau eines Individuums erfolgt gemäß Gleichung (5.11) als ein Vektor mit 13 Elementen. Die ersten sechs Elemente bilden die Spiegelwinkel und die Spiegelposition, die zweiten sechs Elemente beinhalten die Standardabweichungen der ersten sechs Variablen bei der Mutation („Mutationsschrittweiten“) und das letzte Element ist der Fitnesswert des Individuums. Eine Population kann damit als Matrix beschrieben werden, deren Spalten die einzelnen Individuen enthalten.

$$\bar{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{n,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1,6} & \cdots & x_{n,6} \\ \sigma_{1,1} & \cdots & \sigma_{n,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1,6} & \cdots & \sigma_{n,6} \\ F_1 & \cdots & F_n \end{pmatrix} \quad (6.39)$$

Die Populationsmatrix wird im Verlauf des Algorithmus angepasst und enthält immer die Individuen der aktuellen Generation. Ein vereinfachtes Flussdiagramm des Algorithmus ist in Bild 6-18 dargestellt.

Zu Beginn des evolutionären Vorgehens wird die zu findende Optimalposition festgelegt und das korrelierende Reflexionsmuster simuliert oder gemessen. Außerdem wer-

den bei der Initialisierung der Parameter die Grenzen des Suchraums analog zu den Anforderungen an die Optimierung (vgl. Abschnitt 6.3.3.2, Winkel: $\pm 1^\circ$ um Optimalwinkel, Koordinaten: $\pm 0,1\text{mm}$ um Optimalposition) sowie die Simulationsparameter μ , λ , τ und σ festgelegt. Der iterative genetische Optimierungsalgorithmus beginnt mit der Erstellung der Elternpopulation und umfasst insgesamt 4 Hauptschritte.

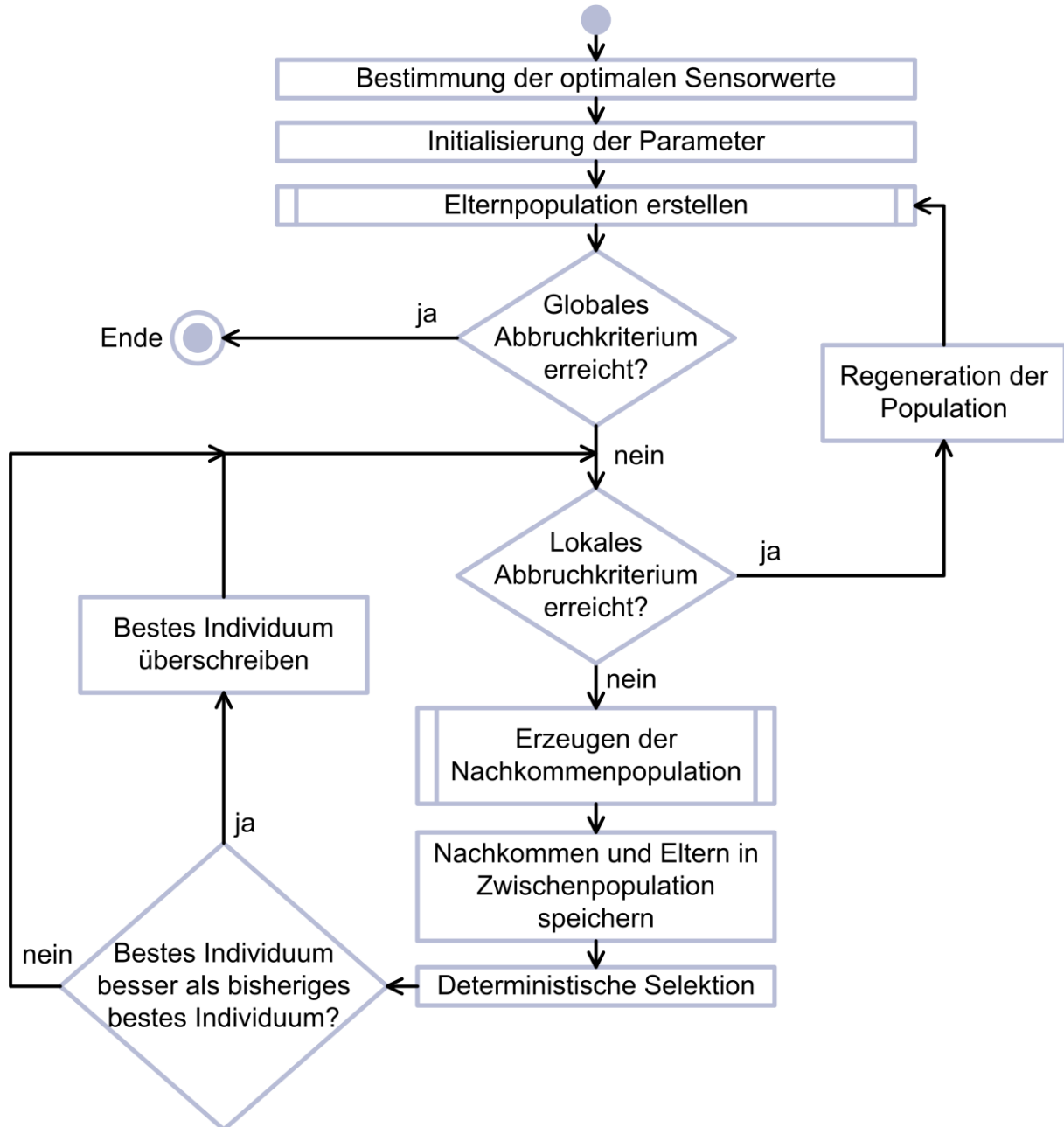


Bild 6-18: Flussdiagramm des evolutionären Algorithmus

Schritt 1: Erstellen der Elternpopulation

Es wird eine Ausgangspopulation von μ Individuen erzeugt, die in der Population \bar{A} gespeichert werden. \bar{A} hat demzufolge die Dimension $13 * \mu$. Die Populationsgröße μ wird zu Beginn auf den Standardwert $\mu = 15$ gesetzt. Die Werte für die Winkel und die Koordinaten der Spiegelposition der Individuen werden zufällig über den Suchraum

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

verteilt. Für alle Standardabweichungen bzw. Mutationsschrittweiten, wird zu Beginn ein Wert von $\sigma = 3$ angenommen (vgl. Abschnitt 5.3.5). Basierend auf den Positionsdaten wird die Fitness jedes Individuums durch die Vorwärtsrechnung (vgl. Abschnitt 6.2) oder durch eine Messung bestimmt. Der ermittelte Wert wird anschließend auf das letzte Vektorelement des Individuums geschrieben. Ist das beste Individuum aus \bar{A} besser als das zuletzt gespeicherte beste Individuum, wird Letzteres durch das beste Individuum aus \bar{A} überschrieben. So lässt sich zu jedem Zeitpunkt der Optimierung auf die beste bisher gefundene Lösung zugreifen. Bild 6-19 zeigt ein Flussdiagramm dieses Ablaufs.

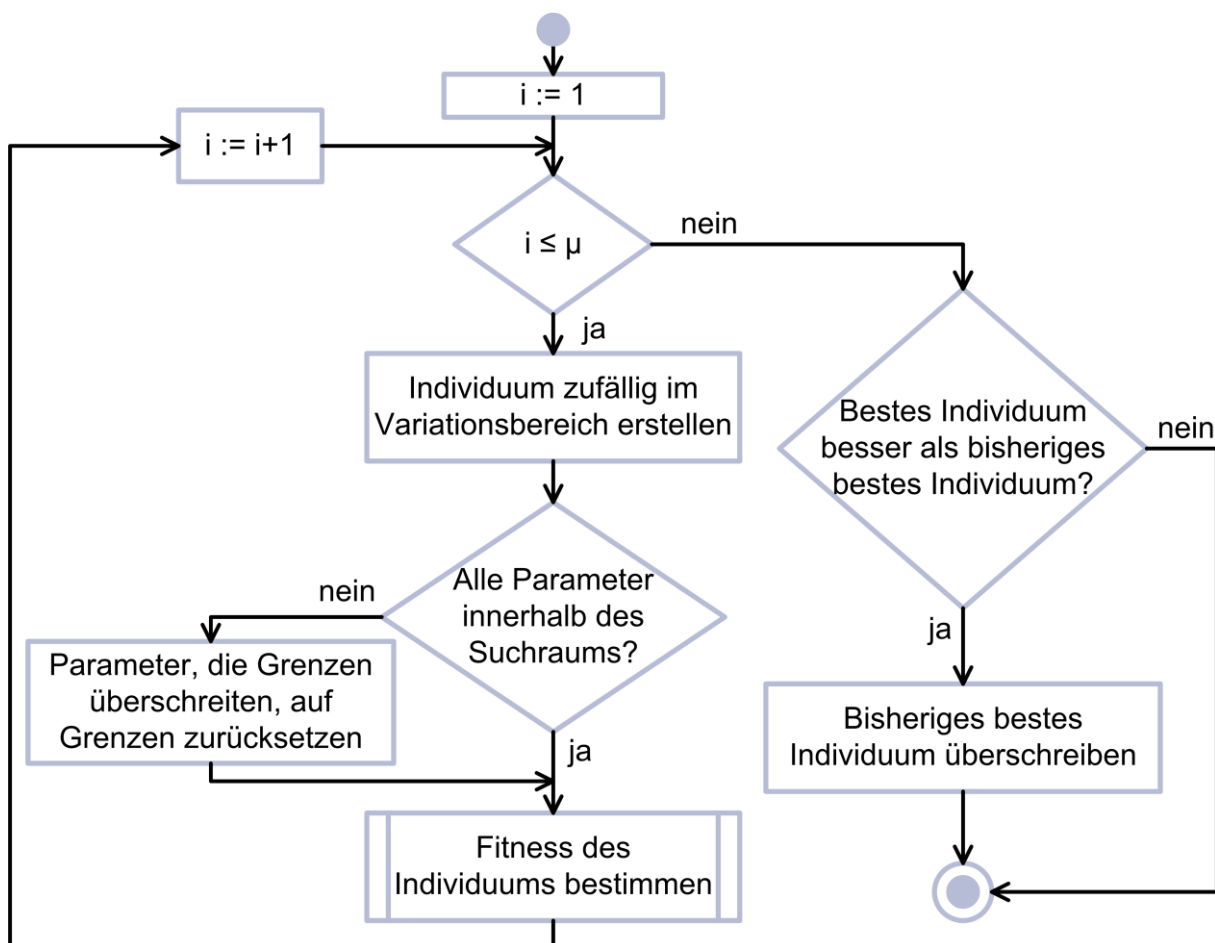


Bild 6-19: Erstellung der Elternpopulation

Schritt 2: Erzeugen der Nachkommen

Aus der Ausgangspopulation der μ Eltern werden λ Nachkommen erzeugt und in der Nachkommenpopulation \bar{B} mit der Dimension $13 * \lambda$ gespeichert. Gemäß den Grundlagen evolutionärer Strategien wird $\lambda = 7 * \mu$ groß gewählt. Für die Erzeugung der Nachkommen werden aus den μ Eltern mittels Repetition zufällig zwei ausgewählt, die intermediär rekombiniert werden, d.h. aus den jeweiligen Werten der zwei Eltern werden die Mittelwerte gebildet. Diese Mittelwerte erhält der Nachkomme als Parameter. Nachdem der Nachkomme auf diese Art generiert wurde, folgt dessen Mutation. Zu-

erst werden die Mutationsschrittweiten durch Multiplikation mit einer logarithmisch normalverteilten Zufallsgröße variiert. Die neuen Mutationsschrittweiten berechnen sich aus den durch die Rekombination erhaltenen Mutationsschrittweiten wie folgt:

$$\sigma'_{j,k} = \sigma_{j,k} * \exp(\tau_1 * N(0,1) + \tau_2 * N_k(0,1)), \quad k = 1 \dots \lambda, j = 1 \dots 6 \quad (6.40)$$

Für die Skalierungsparameter kann entsprechend den in Abschnitt 5.3.5 vorgestellten Standardwerten zunächst $\tau_1 = \tau_2 = 0,15$ angenommen werden. $N(0,1)$ und $N_k(0,1)$ repräsentieren standardnormalverteilte Zufallsgrößen. Nach der Berechnung der Mutationsschrittweiten werden die Positionsparameter durch

$$x'_{j,k} = x_{j,k} + \sigma'_{j,k} * N_j(0,1), \quad k = 1 \dots \lambda, j = 1 \dots 6 \quad (6.41)$$

mutiert. Nachdem die Mutation für ein Individuum k erfolgt ist, wird dessen Fitness nach (6.38) für die neuen Parameterwerte berechnet. Der Einfluss einer solchen Mutation der Parameter auf die Sensorwerte ist in Bild 6-20 beispielhaft dargestellt.

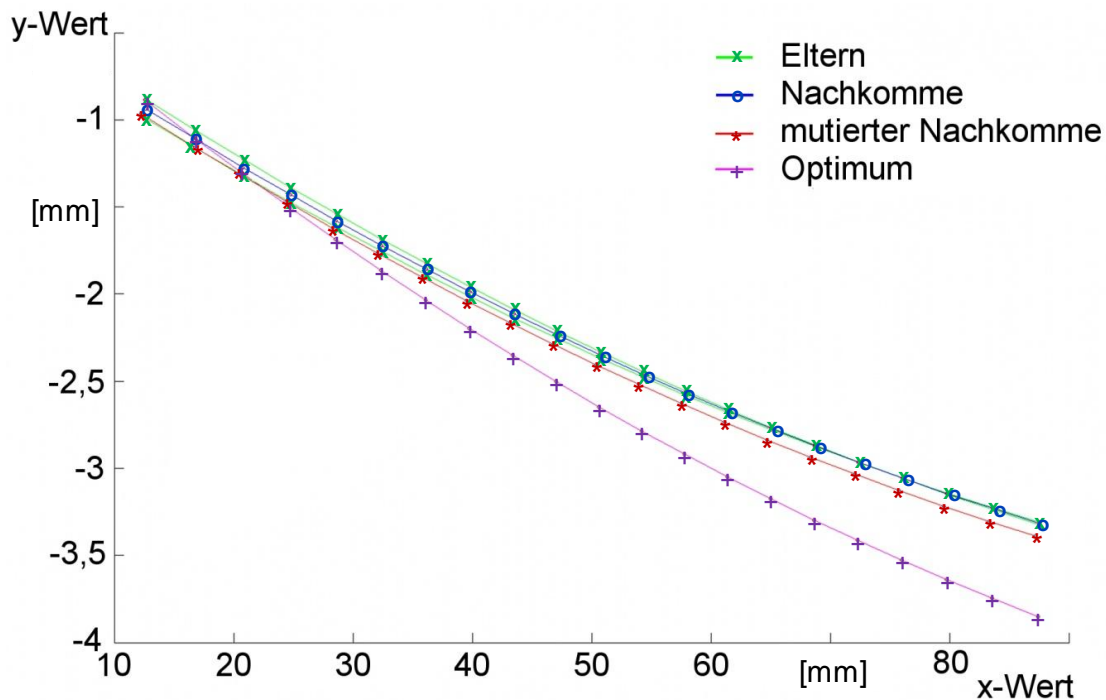


Bild 6-20: Einfluss der Mutation auf das Sensorbild

Das Flussdiagramm in Bild 6-21 gibt einen Überblick über den Prozessablauf bei der Bildung von Nachkommen.

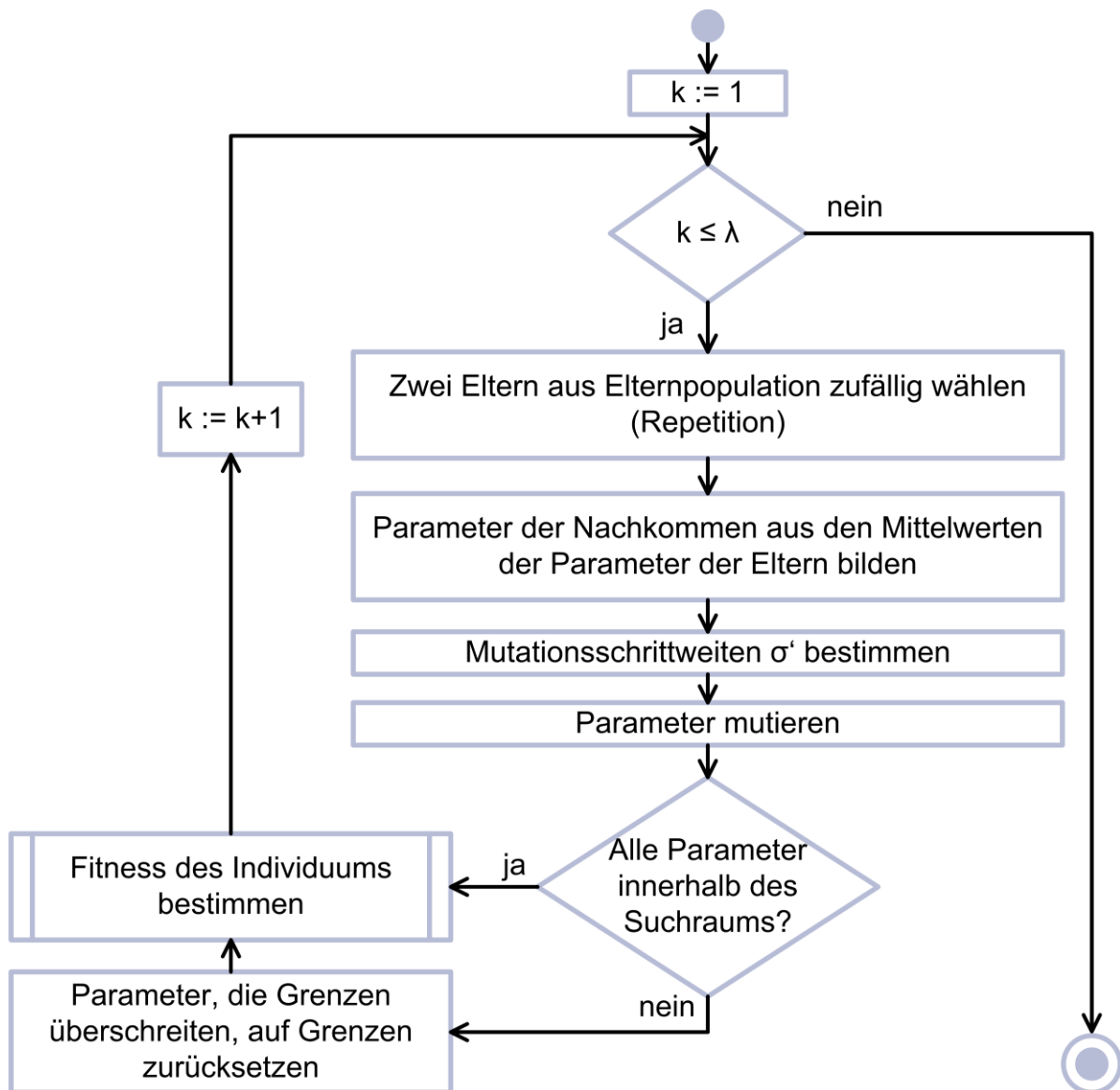


Bild 6-21: Erzeugen einer Nachkommenpopulation

Schritt 3: Deterministische Selektion und lokales Abbruchkriterium

Bei der deterministischen Selektion wird die Elternpopulation für den nächsten Durchlauf der iterativen Optimierungsschleife innerhalb des Algorithmus gebildet (vgl. Bild 6-18). Dabei werden die Individuen mit den besten Fitnesswerten je nach Selektionsschema ausschließlich aus der Nachkommenpopulation $[(\mu, \lambda)$ -Schema] oder aus der Menge der Eltern und der Nachkommen $[(\mu+\lambda)$ -Schema] ausgewählt (vgl. Abschnitt 5.3.5). Welches der beiden Schemata für die LRP besser geeignet ist, lässt sich nur empirisch ermitteln (NISSEN 2000). Die Wahl des Selektionsschemas ist deshalb zunächst irrelevant und wird später aus der Operatoranalyse abgeleitet. Die erste Implementierung folgt dem $(\mu+\lambda)$ -Schema.

Ist die neue Elternpopulation \bar{A}' bestimmt, fährt der Algorithmus mit der Erzeugung von Nachkommen fort (Schritt 2) bis die Fitness des besten Individuums das lokale Abbruchkriterium unterschreitet. Ist dies der Fall, folgt Schritt 4.

Schritt 4: Regeneration der Population

Die Population wird beim Erreichen bestimmter Fitnesswerte mit angepassten Ausgangsparametern neu initialisiert. Dadurch erhöht sich die Diversität der Population. So wird verhindert, dass sich alle Individuen um ein lokales Optimum ansiedeln. Über mehrere Generationen führt dies zu einer schnelleren Konvergenz des Fitnesswerts und damit zu einer Beschleunigung des Optimierungsprozesses.

Als lokales Abbruchkriterium wird für den evolutionären Algorithmus der LRP eine Reduktion der Fitness des besten Individuums um eine Zehnerpotenz definiert. Die Neuerschaffung der Population erfolgt analog zu Schritt 1. Zugleich wird der Suchraum angepasst. Die Mitte des Suchraums wird dabei auf das bisher beste Individuum gelegt und die Suchraumgröße mit jeder Iteration für alle Parameter um den Faktor $1/\sqrt{10}$ verkleinert. Dieser Wert orientiert sich am lokalen Abbruchkriterium. Tabelle 6-7 zeigt – ausgehend von der optimalen Spiegelposition – die Entwicklung der Fitness in Abhängigkeit von den translatorischen und rotatorischen Abweichungen der Positionsdaten. Die der Fitness zugrunde liegenden Individuen sind dabei definiert durch

$$\vec{x}_i = \vec{x}_{opt} + \vec{\Delta}_i \quad \begin{cases} \Delta_i(j) = 10^{-i} \\ j = 1 \dots 6 \end{cases} \quad (6.42)$$

Die Fitnesswerte selbst werden über die Simulation des Reflexionsmusters analog zu Abschnitt 6.2 bestimmt.

Index i	Abweichung Δ_i [mm °]	Fitnesswert F_i [mm ²]	Δ_{i+1}/Δ_i	F_{i+1}/F_i
1	10^{-1}	0.206901730691178	0,1	0,01004
2	10^{-2}	0.002076994406202	0,1	0,01000
3	10^{-3}	0.000020777987283	0,1	0,01000
4	10^{-4}	0.000000207787923	0,1	0,01000
5	10^{-5}	0.000000002077887	0,1	0,01000
6	10^{-6}	0.000000000020779	0,1	0,01001
7	10^{-7}	0.000000000000208	0,1	0,00999
8	10^{-8}	0.000000000000002		

Tabelle 6-7: Zusammenhang zwischen Parameterabweichung und Fitnesswert

Aus jeder Verringerung der Abweichung der Parameter vom Optimalwert um eine Zehnerpotenz folgt eine Verringerung der Fitness um eine Hunderterpotenz. Daraus lässt sich schließen, dass bei einer Verringerung der Fitness um eine Zehnerpotenz, die

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

dem lokalen Abbruchkriterium entspricht, eine Verringerung der Abweichung um den Faktor $1/\sqrt{10}$ erfolgen muss. Es gilt

$$\frac{F_{i+1}}{F_i} = \frac{1}{100} = \left(\frac{1}{10}\right)^2 = \left(\frac{\Delta_{i+1}}{\Delta_i}\right)^2 \quad (6.43)$$

Schritt 5: Das globale Abbruchkriterium

Ist das globale Abbruchkriterium erreicht, d.h. der Fitnesswert des besten Individuums ist kleiner als 10^{-9} mm^2 , wird die Optimierung abgebrochen. Je nach Einsatz der Laserreflexiven Positionierung wird nun das beste Individuum als Lösung ausgegeben und die Positionierung abgeschlossen. Bild 6-22 zeigt den Fitnesswert des jeweils besten Individuums einer Generation über den Generationenindex einer Beispielpositionierung. Gut zu erkennen sind die stetige Reduktion des Fitnesswerts im Verlauf der Generationen und der damit verbundene Fortschritt der Lösungsfindung.

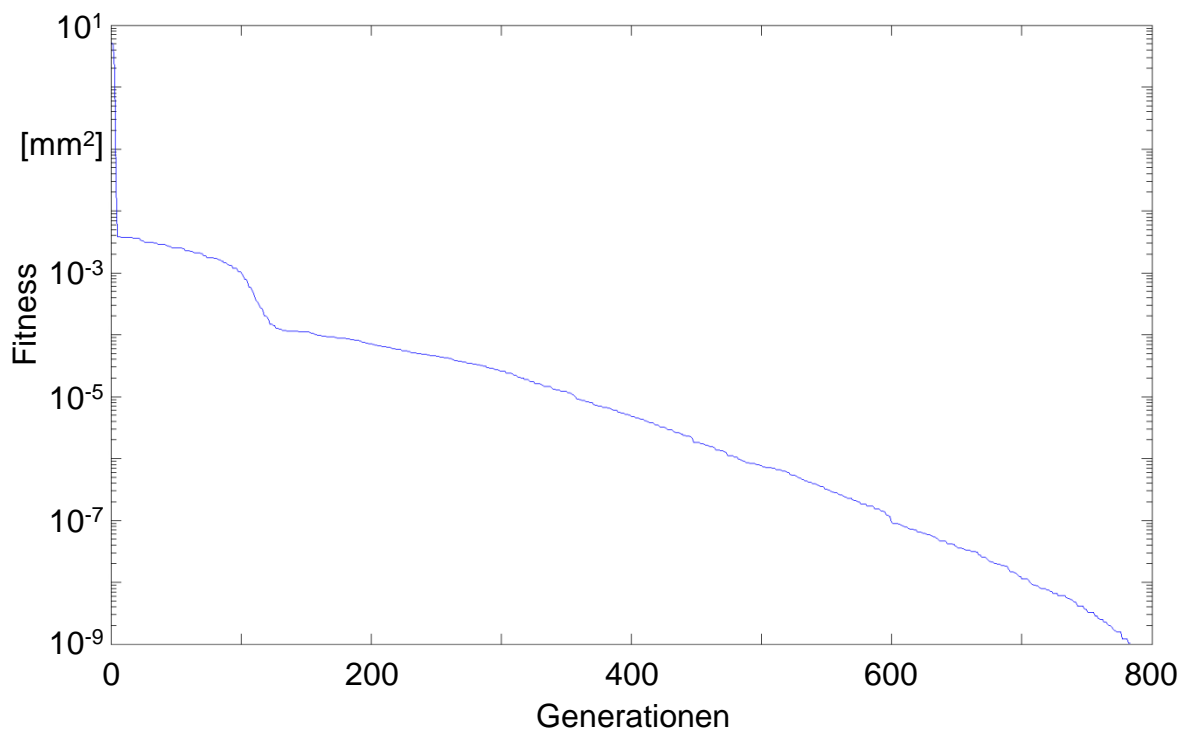


Bild 6-22: Verlauf der besten Fitness einer Generation über den Generationenindex

6.3.3.4 Operatoranalyse

Nach der Entwicklung der Grundstruktur des evolutionären Algorithmus folgt die Operatoranalyse. Dabei werden die *evolutionären Operatoren* eingestellt. Als Evolutionsoperatoren definiert sind die Selektionsstrategie und die Parameter τ_1 und τ_2 zur Anpassung der Mutationsschrittweiten. Dies ist notwendig, da die evolutionären Operatoren stark anwendungsabhängig sind und empirisch angepasst werden müssen

(WEICKER 2007). Außerdem werden die *Evolutionsparameter*, also die Populationsgröße μ und die Startwerte der Mutationsschrittweiten σ_1 , optimiert. Kriterien, nach denen die Güte des Algorithmus bewertet werden kann, sind der beste erreichte Fitnesswert, der durchschnittlich erreichte Fitnesswert, die Erfolgswahrscheinlichkeit für das Unterschreiten eines bestimmten Fitnesswerts bei fester Generationenanzahl, die Generationenanzahl bis zum Unterschreiten eines bestimmten Fitnesswerts und die Rechenzeit. Für die Ermittlung optimaler Strategieparameter sowie des Selektionschemas bietet sich als Bewertungskriterium die Anzahl der benötigten Generationen an. Sie hängt direkt mit der Laufzeit zusammen und ist unabhängig von der verwendeten Hardware. Für die Bestimmung der optimalen Populationsgröße kann die Anzahl der Generationen allerdings nicht genutzt werden. Die Veränderung der Populationsgröße während der Optimierung hat zur Folge, dass die Laufzeit und die Anzahl der über alle Generationen erzeugten Individuen nicht nur von der Generationenanzahl abhängen. Zur Bewertung der Populationsgröße wird deshalb die Rechenzeit selbst gewählt. Diese ist allerdings von der verwendeten Hardware abhängig, weshalb die Optimierung unter vergleichbaren Systembedingungen durchgeführt werden muss.

Als erster Evolutionsoperator wird die Selektionsstrategie bestimmt. Sie beeinflusst das Verhalten des Algorithmus grundlegend und damit dessen Reaktion auf die Änderung der Mutationsoperatoren oder der Evolutionsparameter. Als Entscheidungsgrundlage dient die Anzahl Generationen n_G , die zum Erreichen eines bestimmten Fitnesswerts benötigt werden. Die $(\mu+\lambda)$ -Selektion zeigt hier deutliche Vorteile gegenüber einer (μ, λ) -Selektion. Besonders im Hinblick auf die Generationenanzahl und damit auf die Geschwindigkeit des Algorithmus erzielt die $(\mu+\lambda)$ -Selektion bessere Ergebnisse. Bei einer Berechnung von jeweils fünf Optimierungen (Zielfitnesswert $F = 10^{-6} \text{ mm}^2$) ergeben sich die in Bild 6-23 dargestellten Verläufe der Fitness über die Anzahl an erzeugten Generationen. Für die übrigen Evolutionsgrößen wurden die in Tabelle 6-8 zusammengefassten Standardwerte angenommen.

Evolutionsoperator	Wert
τ_1	0,15
τ_2	0,15
μ	15
λ	$7 * \mu$
σ_1	3,0

Tabelle 6-8: Standardwerte für Evolutionsoperatoren und -parameter (NISSEN 2000)

Die Ursache für die geringere Generationenanzahl der $(\mu+\lambda)$ -Selektion liegt in der Integration der Elternpopulation in die Individuenauswahl. Die besten Individuen blei-

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

ben so generationenübergreifend erhalten. Bei der (μ, λ) -Selektion wird dagegen die neue Elterngeneration nur aus der Nachkommenpopulation ausgewählt. Deshalb kann der Fall eintreten, dass die besten Individuen aus der Nachkommenpopulation \bar{B} schlechter sind als die besten der Elternpopulation \bar{A} .

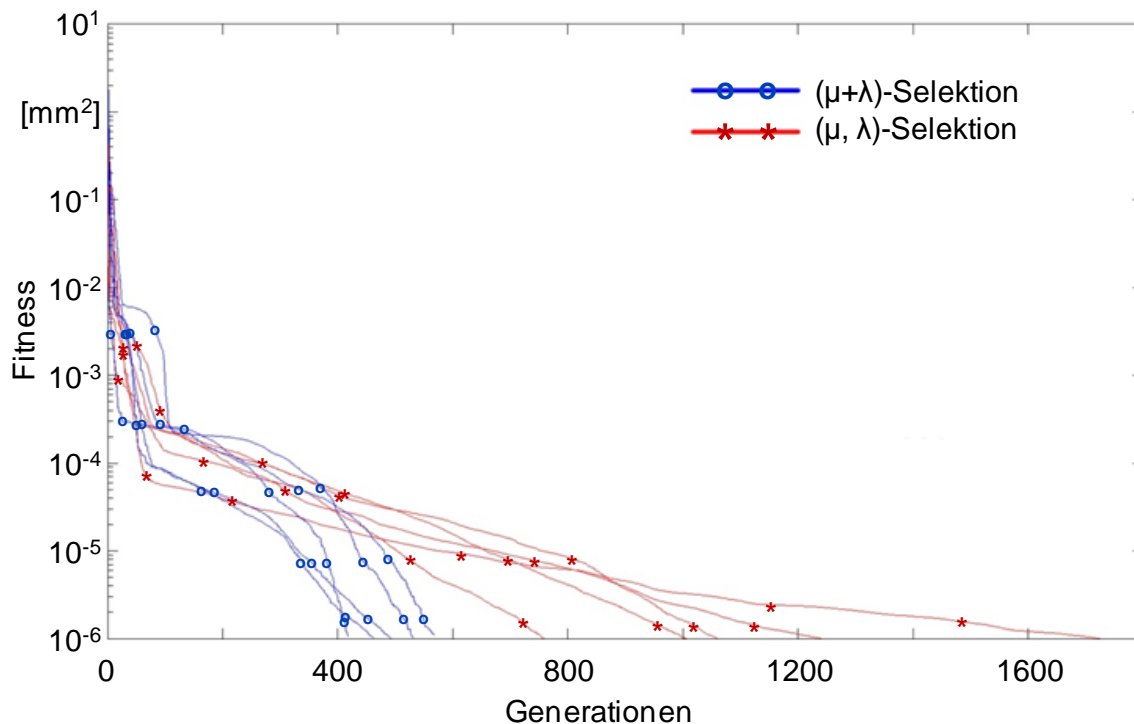


Bild 6-23: Fitnesswert über Generationen für $(\mu+\lambda)$ - und (μ, λ) -Selektion

Nach der Auswahl der $(\mu+\lambda)$ -Selektion als Strategie für die LRP folgt die Optimierung der Mutationsoperatoren. NISSEN (2000) gibt für die Operatoren τ_1 und τ_2 einen Standardwert von 0,15 vor, der innerhalb der Stabilitätsgrenzen $[0,1; 0,2]$ variiert werden kann. Aus dem Zusammenhang zwischen der Anzahl Generationen n_G , die der evolutionäre Algorithmus benötigt, um ein Individuum mit einer bestimmten Fitness zu finden, und den Mutationsoperatoren, lassen sich die optimalen Werte für τ_1 und τ_2 ableiten. Die Standardabweichung der Generationenanzahl über mehrere Berechnungen hinweg kann dabei als Kriterium für das Konvergenzverhalten und die Stabilität des Algorithmus bei den entsprechenden Werten herangezogen werden. Je größer die Standardabweichung $\sigma_{\bar{n}_G}(n_G)$ ist, desto schwächer konvergiert die Generationenanzahl und desto instabiler verhält sich der Algorithmus. Tabelle 6-9 zeigt ausgewählte Ergebnisse einer vollfaktoriellen Sensitivitätsanalyse mit einer Wertediskretisierung von $\Delta\tau_{1/2} = 0,025$. Dargestellt sind die fünf Wertekombinationen mit der über zehn Positionsberechnungen geringsten Anzahl durchschnittlich zur Lösung benötigter Generationen ($n_G \leq 300$). Insgesamt wurden entsprechend der Wertediskretisierung 25 Kombinationen untersucht. Sowohl Ziel- als auch Ausgangsposition wurden über alle Positionierungen konstant gehalten, als Zielfitness wurde $F \leq 10^{-6} \text{ mm}^2$ vorgegeben.

6.3 Algorithmen zur Positionsberechnung

Strategieparameter		Mittelwert n_G	Standardabw. $\sigma(n_G)$
τ_1	τ_2		
0,175	0,100	256,40	80,15
0,175	0,125	289,40	147,05
0,175	0,175	275,60	61,27
0,200	0,175	251,40	85,53
0,200	0,200	291,20	32,10

Tabelle 6-9: Generationenanzahl in Abhängigkeit von $\tau_{1/2}$ (ausgewählte Werte)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wertekombination $\tau_1 = \tau_2 = 0,2$ eine hohe Geschwindigkeit bei einem sehr guten Stabilitätsverhalten des evolutionären Algorithmus zur LRP gewährleistet. Zwar liegt die Generationenanzahl nur auf Platz 5 aller 25 in der Sensitivitätsanalyse untersuchten Permutationen, aber die Standardabweichung ist mit Abstand die geringste. Gegenüber der schnellsten Parameterkombination $\tau_1 = 0,2$ und $\tau_2 = 0,175$ arbeitet der Algorithmus um 166 % stabiler und lediglich 16 % langsamer. Aus diesem Grund werden für die Strategieparameter des evolutionären Algorithmus die Werte $\tau_1 = \tau_2 = 0,2$ eingesetzt.

Aufbauend auf den evolutionären Operatoren werden die Evolutionsparameter eingestellt, also die Populationsgrößen und die Mutationsschrittweiten. Für die Populationsgröße gilt analog zu Abschnitt 5.3 $\mu \in \mathbb{N}$. Betrachtet man die über 10 Positionierungen gemittelte Rechenzeit bis zu einem Fitnesswert $F \leq 10^{-9}$ in einem Bereich von $3 \leq \mu \leq 15$, zeigt sich der in Bild 6-24 dargestellte Zusammenhang (($\mu+\lambda$)-Selektion; $\tau_1 = \tau_2 = 0,2$; $\lambda = 7 * \mu$). Das Minimum der Rechenzeit liegt bei $\mu = 6$.

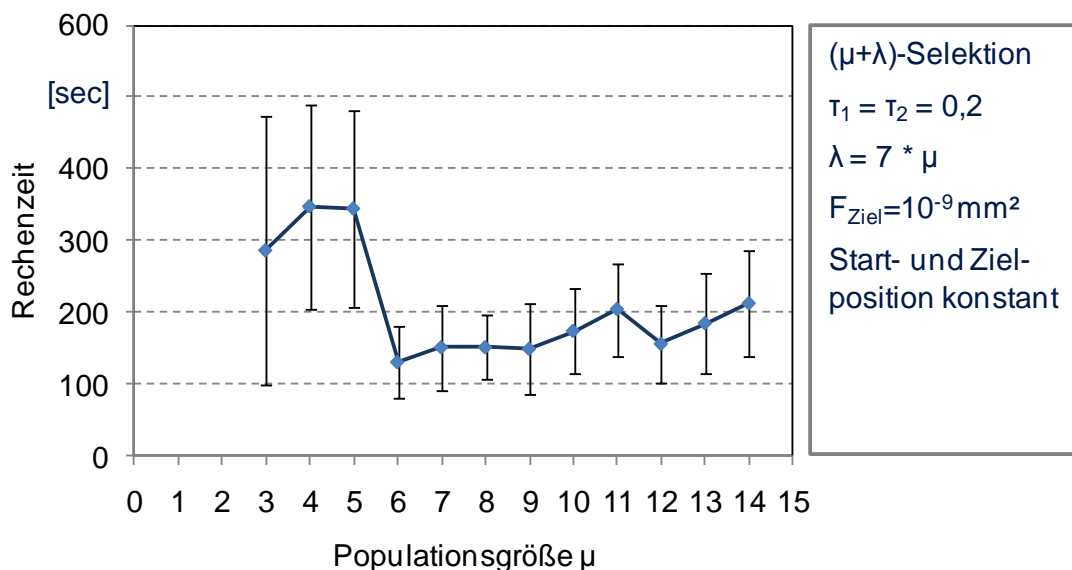


Bild 6-24: Rechenzeit in Abhängigkeit von der Populationsgröße

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

Ebenso wie die Größe der Kernpopulation beeinflusst auch die Größe der Nachkommenpopulation $\lambda = n * \mu$ die Geschwindigkeit des Algorithmus. Auch für den Populationsmultiplikator $n \in \mathbb{N}$ lässt sich hinsichtlich der Rechenzeit ein Optimum für die Laserreflexive Positionierung bestimmen (Bild 6-25). Der über 100 Positionierungen pro Multiplikatorwert empirisch ermittelte Optimalwert liegt bei $n = 8$. Die durchschnittlich zur Lösung benötigte Rechenzeit ist abhängig vom verwendeten Computersystem; das verwendete System benötigte durchschnittlich 85,42 Sekunden.

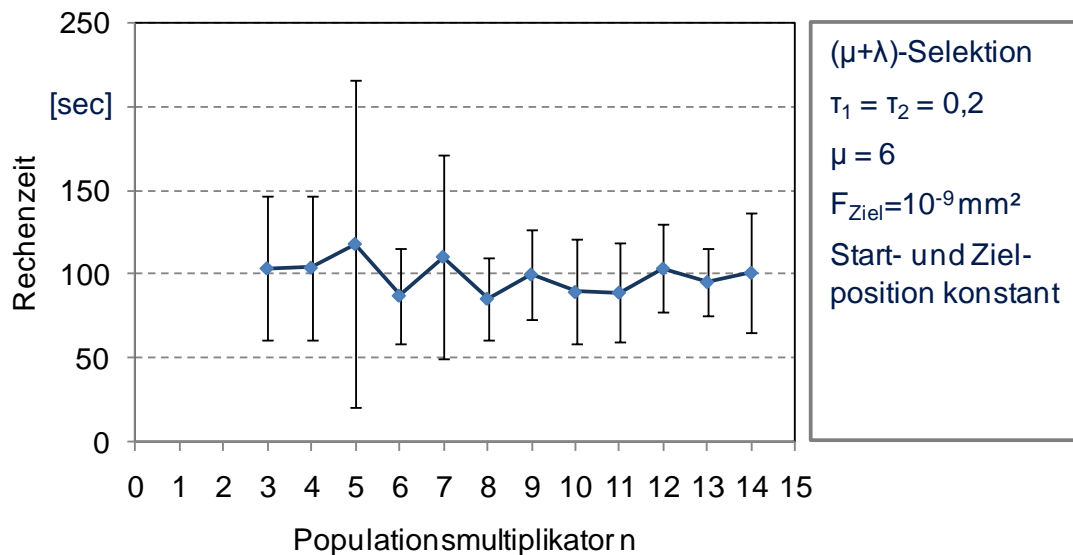


Bild 6-25: Rechenzeit in Abhängigkeit vom Populationsmultiplikator

Im letzten Schritt der Operatoranalyse werden die Startwerte σ_1 der Mutationsschrittweiten angepasst. Bei der LRP werden für alle Parameter einzelne Mutationsschrittweiten angegeben. Die einzelnen Parameter sind voneinander unabhängig. Nach EIBEN ET AL. (2007) liegt damit eine unkorrelierte Mutation vor. Die Autoren empfehlen, die Anzahl unterschiedlicher Mutationsschrittweiten gering zu halten, da sich dies positiv auf die Geschwindigkeit und das Konvergenzverhalten des Algorithmus auswirke. Unterscheiden sich die Parameter der Individuen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Fitness nur geringfügig, sollten deren Mutationsstartwerte gleich gewählt werden. Wie bereits gezeigt, haben die Spiegelwinkel einen deutlich stärkeren Einfluss auf das Reflexionsmuster als die Mittelpunktposition des Spiegels. Sie müssen deshalb getrennt von den Mittelpunktskoordinaten betrachtet werden. Die Parameter der Individuen werden daher in zwei Gruppen mit jeweils gleichen Startwerten der Mutationsschrittweiten unterteilt. Die erste Gruppe umfasst alle rotatorischen Freiheitsgrade und besitzt den Startwert σ_{Winkel} , die zweite enthält alle translatorischen Freiheitsgrade und startet mit σ_{XYZ} . Innerhalb der Gruppen ähneln sich die Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf das Reflexionsmuster und die Funktion des fertig montierten Produkts. Anhand der Anzahl der Generationen, die der Algorithmus benötigt um eine Zielfitness von $F = 10^{-9}$ zu erreichen, lässt sich in Abhängigkeit von den Startwerten der Mu-

tationsschrittweiten eine Aussage über deren Optimalwerte treffen. Zur Analyse der Startwerte wurden die Mutationsschrittweiten im Wertebereich von 0 bis 4 in Abständen von 0,2 vollfaktoriell untersucht. Für jede Wertekombination wurden 25 Berechnungen durchgeführt, deren Mittelwerte dann zur Bewertung der Parameterkombination dienen. Für die anderen Evolutionsoperatoren wurden die bisher ermittelten Optimalwerte eingesetzt.

Startwerte für die Mutationsschrittweiten um den Standardwert von $\sigma = 3$ zeigen eine deutliche höhere Generationenanzahl im Vergleich zu geringeren Werten für σ . EIBEN & SMITH (2003) beschreiben dieses Verhalten als charakteristisch für Probleme mit wenigen Nebenoptima, da kleinere Mutationsschrittweiten zu einer feineren Abtastung des Lösungsraums führen. Der evolutionäre Algorithmus zeigt die Mindestanzahl von Generationen, die benötigt wird, um eine Zielfitness von $F = 10^{-9}$ zu erreichen, im Bereich von 0 bis 0,2 für σ_{Winkel} und σ_{XYZ} . In Bild 6-26 ist der gesamte Untersuchungsraum und ein feingranularer Ausschnitt des Bereichs $0 < \sigma < 0,2$ dargestellt.

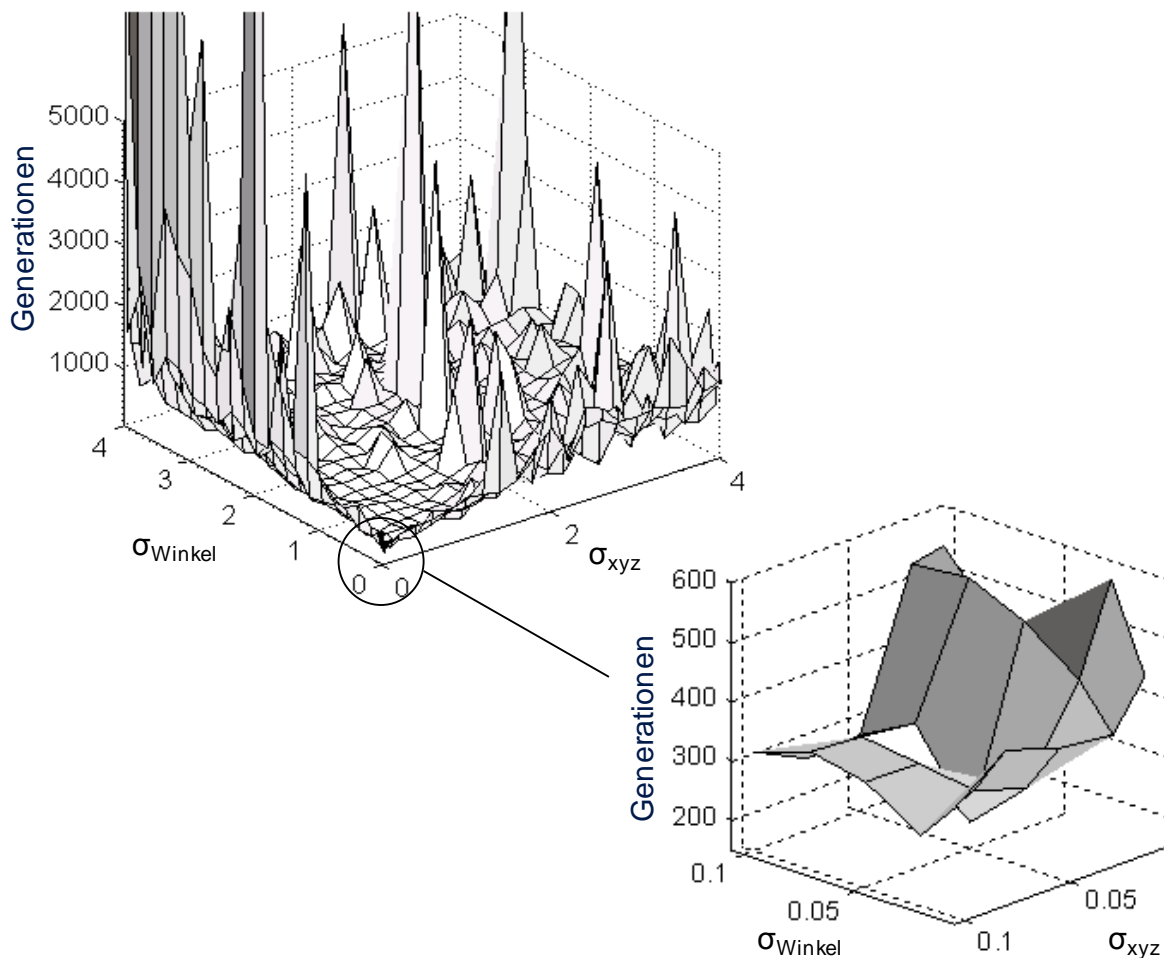


Bild 6-26: Korrelation zwischen Mutationsschrittweiten und Anzahl der Generationen

Für die LRP liegt die Mindestanzahl der benötigten Generationen gemäß Bild 6-26 bei $\sigma_{\text{Winkel}} = \sigma_{\text{XYZ}} = 0,05$ und beträgt im Mittel 253 Generationen mit einer Standardabweichung von $s = 32,3$. Für alle weiteren Berechnungen werden diese Werte als Stan-

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

dardwerte eingesetzt. Die für den evolutionären Algorithmus ermittelten optimalen Operatoren sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst.

Evolutionsoperator	Optimaler Wert
τ_1	0,2
τ_2	0,2
μ	6
λ	$8 * \mu$
$\sigma_1 = \sigma_{\text{Winkel}} = \sigma_{\text{XYZ}}$	0,05

Tabelle 6-10: Optimierte Werte der Evolutionsooperatoren

6.3.3.5 Stabilität, Genauigkeit und Laufzeit

Im Allgemeinen kann die Stabilität evolutionärer Algorithmen nicht garantiert werden. Individuen können sich an lokalen Optima „festfressen“ oder in technisch nicht plausible Wertebereiche abdriften (EIBEN ET AL. 2007). Darüber hinaus kann es bei der LRP zu einer mutationsbedingten Divergenz der Parameter kommen, die sich infolge dessen immer weiter vom Optimum entfernen. Durch die Beschränkung des Suchraums kann dieses Problem für die Laserreflexive Positionierung allerdings vollständig eliminiert werden. *Sind die zulässigen Winkel auf $\pm 1^\circ$ und die Positionen auf $\pm 0,1 \text{ mm}$ um die Optimalwerte beschränkt und alle Individuen der Anfangspopulation in diesem Bereich gewählt, konvergiert das Ergebnis in den vorliegenden Versuchsreihen immer gegen das Optimum innerhalb dieses Suchraums.* Bild 6-27 zeigt zur Veranschaulichung den Verlauf des Fitnesswerts über den Generationenindex von 30 gerechneten Optimierungsvorgängen. Der Fitnesswert bleibt nur in wenigen Fällen über mehrere Generationen konstant und selbst dann tritt nach einiger Zeit eine zufällige Mutation auf, sodass der Fitnesswert weiter sinkt. Ab einem Grenzwert von $F \approx 10^{-4} \text{ mm}^2$ sinkt die Fitness mit steigender Generationenanzahl nahezu linear und konvergiert schließlich gegen Null.

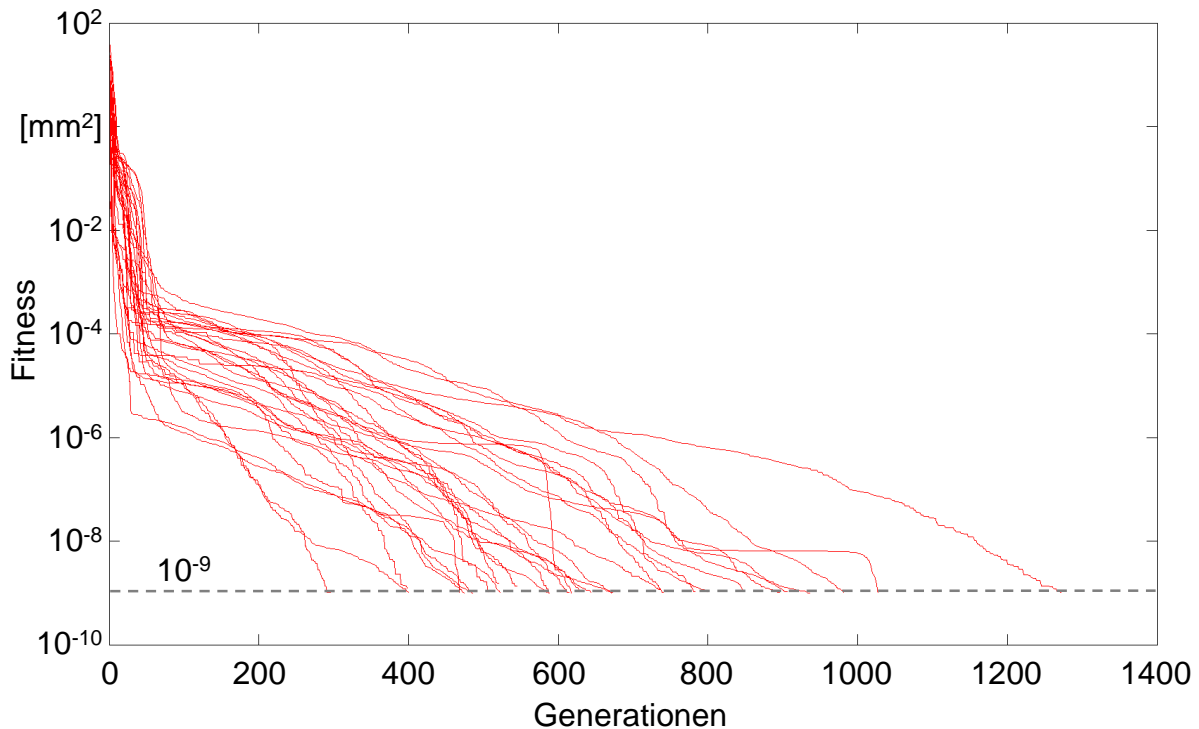


Bild 6-27: Fitnesswert über den Generationenverlauf für 30 Optimierungsvorgänge

Bei einem Fitnesswert von 10^{-9} mm^2 ist der maximale Fehler eines Punkts auf dem Sensor $\sqrt{10^{-9}} \text{ mm} \approx 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ und der durchschnittliche Fehler aller 21 Messpunkte $\sqrt{10^{-9}/21} \text{ mm} \approx 6,90 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$ (vgl. Abschnitt 6.3.3.2). Das durch den Optimierungsalgorithmus erzeugte Muster liegt dann so nahe am Optimalmuster, dass eine Abweichung sensortechnisch kaum mehr messbar ist.

Durch einen niedrigen Fitnesswert wird allerdings die Genauigkeit der einzelnen Parameter nicht garantiert. Für bestimmte Wertebereiche haben einige Parameter eine sehr viel stärkere Auswirkung auf das Reflexionsmuster als andere: Generell haben alle Winkel einen sehr viel größeren Einfluss auf das Reflexionsmuster als die Position des Spiegels, insbesondere ist die y-Koordinate des Auftreffpunkts auf dem Sensor bei bestimmten Orientierungen des Spiegels unabhängig von dessen Position und nur durch die Spiegelwinkel bestimmt. Auch hat eine Verschiebung des Spiegels entlang seiner Drehachse prinzipbedingt keine Auswirkungen auf das Reflexionsmuster. Die Abhängigkeiten der Parameter voneinander werden bei der Fitnessbetrachtung für ungenaue Winkel deutlich. Ist der Algorithmus bei einem ausreichend niedrigen Fitnesswert angelangt, stimmen die Winkel verhältnismäßig genau mit den Optimalwerten überein. Die Position kann jedoch auch bei niedrigen Fitnesswerten eine deutliche Abweichung haben. Problematisch ist, dass für fehlerhafte Winkel (z.B. mit einer Abweichung von 10^{-5} °) eine deutlich von der Optimalposition abweichende Position des Spiegelmittelpunkts, einen besseren Fitnesswert liefert als die Optimalposition selbst. Aus diesem Grund bricht der Algorithmus an dieser fehlerhaften Position ab. Bild 6-28 zeigt die Fehlerverteilungen über 50 Positionierungen. Analog zu dem in Bild 6-11 (b,

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

Monte-Carlo-Simulation) dargestellten Flussdiagramm wurden die Spiegelpositionen innerhalb des in Tabelle 6-5 spezifizierten Werteraums zufällig gewählt.

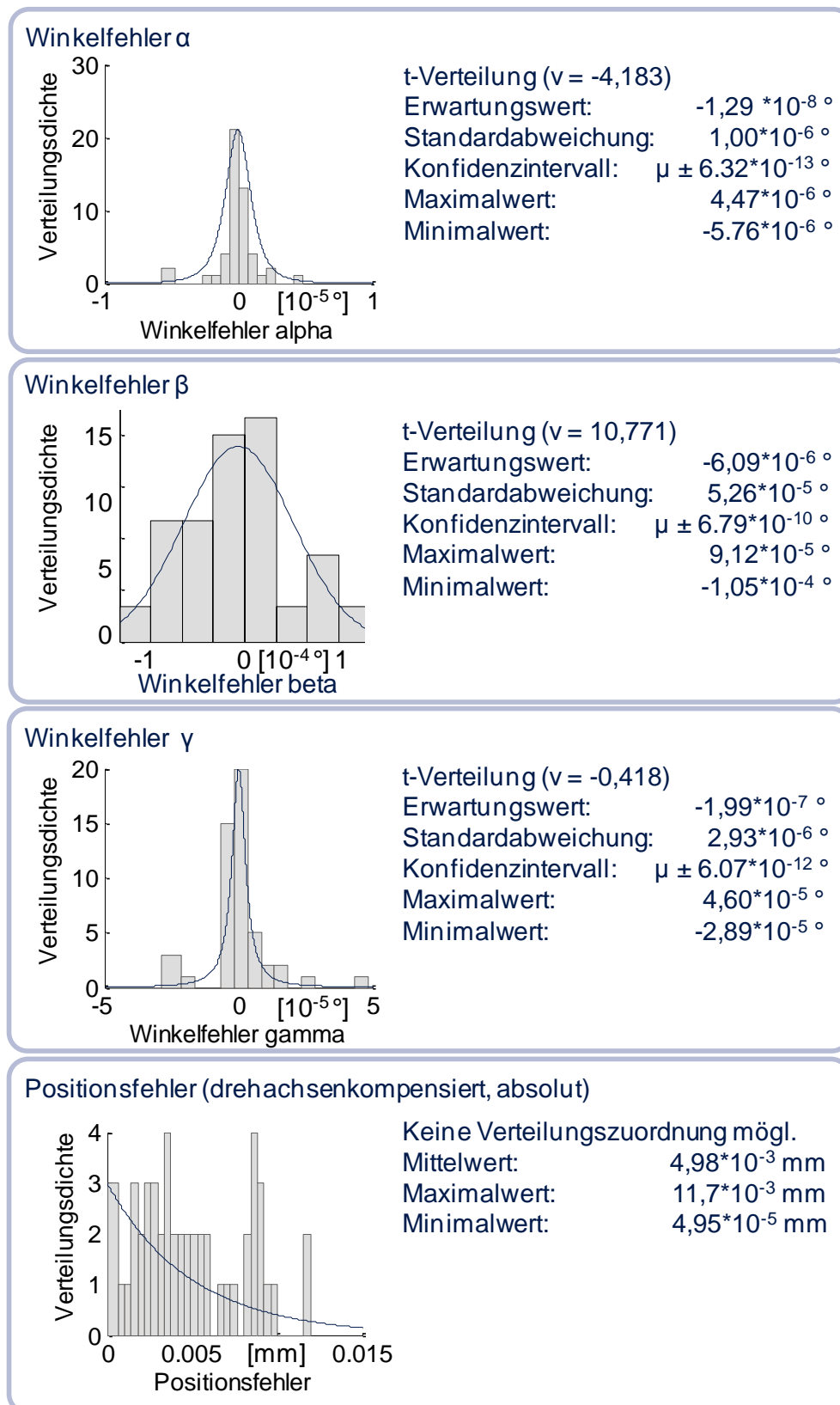


Bild 6-28: Positionierungs-Fehler des evolutionären Algorithmus

Die Werte der durchschnittlichen Positionsfehler zeigen eine sehr hohe Genauigkeit. Durch mehrfache Ausführung des Algorithmus kann der Einfluss fehlerhaft ermittelter Winkel reduziert und damit die Genauigkeit des Ergebnisses stark verbessert werden.

Der maximale theoretische Winkelfehler des evolutionären Algorithmus liegt bei $9,12 \cdot 10^{-5}$ ($\Delta\beta_{\max}$). Die aus der Stichprobe statistisch ermittelten theoretischen Fehler für die Winkelberechnungen liegen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,5 % innerhalb der Konfidenzintervalle

- $-1,3 \cdot 10^{-8} \text{ }^\circ - 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ }^\circ < \Delta\alpha < 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ }^\circ + 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ }^\circ$,
- $-6,1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ - 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ }^\circ < \Delta\beta < -6,1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ + 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ }^\circ$ und
- $-2,0 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ - 6,1 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ < \Delta\gamma < -2,0 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ + 6,1 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ$.

Die Werte für den drehachsenkompensierten Positionsfehler (DK-Fehler) folgen keiner spezifischen Verteilung. Für den DK-Fehler kann deshalb kein Konfidenzintervall berechnet werden. Der mittlere Positionsfehler beträgt $4,98 \text{ } \mu\text{m}$, der maximale Fehler innerhalb der Stichprobe $11,7 \text{ } \mu\text{m}$.

Die Winkelgenauigkeit erreicht klar den für die Montage optischer Mikrosysteme geforderten Wert von $0,01 \text{ }^\circ$ (vgl. Abschnitt 6.1.1). Der mittlere translatorische Fehler entspricht ebenfalls den Anforderungen der Montage optischer Mikrosysteme. Aufgrund der Werteverteilung kann für den DK-Fehler allerdings kein statistisch belastbares Fehlerintervall angegeben werden. Jedoch liegen 95 % der Stichprobe unterhalb eines Werts von $10 \text{ } \mu\text{m}$. Damit erfüllt der evolutionäre Algorithmus theoretisch die Anforderungen an die Montage optischer Mikrosysteme.

Die Laufzeit des Algorithmus ist direkt abhängig von der Anzahl der während der Optimierung erzeugten Individuen und der Leistung des zur Berechnung genutzten Computersystems. Bei der hier durchgeführten Monte-Carlo-Simulation wurde eine Berechnungszeit von durchschnittlich 154 Sekunden pro Positionierung mit einer Standardabweichung von 54,3 Sekunden erzielt. Die maximale Berechnungszeit lag bei 264 Sekunden.

6.4 Zusammenfassung

Mit der Laserreflexiven Positionierung wurde ein Sensorkonzept für die Mikromontage entwickelt, mit dem die Positionen von Mikrokippspiegeln hochgenau in sechs räumlichen Freiheitsgraden bestimmt werden können. Das Sensorkonzept erlaubt die Positionierung der Spiegel bezüglich fügeferner Positionsreferenzen und funktioniert auch, wenn die optische und taktile Zugänglichkeit zu den Mikrospiegeln stark eingeschränkt ist. Zur Lagerkennung der mikrooptischen Komponenten wird das Muster eines über den Mikrospiegel reflektierten Laserstrahls ausgewertet. Die Sensorik nutzt

6 Laserreflexionsbasierte Positionsbestimmung beweglicher Mikrospiegel

dabei das Prinzip der mechatronischen Montage nach ANGERER (2004), um die Kinematik der Mikrospiegel bereits während der Montage anzusteuern mit dem Ziel, das Reflexionsmuster zu erzeugen.

Die zentrale Herausforderung bei der Laserreflexiven Positionierung liegt in der Berechnung der Bauteilposition auf der Grundlage von den Sensordaten. Aus dem zweidimensionalen Reflexionsmuster und der relativen Position der Spiegelkinematik ist die Position des Schwingspiegels in sechs räumlichen Freiheitsgraden eindeutig zu bestimmen.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Reflexionsmuster und Spiegelposition wurde zunächst ein Simulationsmodell entwickelt, das die Sensordaten abhängig von der Bauteillage durch Modelle der geometrischen Optik berechnet und visualisiert. Aufbauend auf der Analyse des Simulationsmodells konnten zwei allgemein gültige Ansätze zur Lösung des Positionsproblems entwickelt werden, eine Lösung auf Basis eines analytisch-numerischen Modells und eine Lösung auf Basis der genetischen Optimierung. Für beide Ansätze wurden Algorithmen zur computergestützten Berechnung implementiert.

Mithilfe der stochastischen Simulation wurde für beide Algorithmen gezeigt, dass die Position von Mikrospiegeln mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann und die Anforderungen an die Montage optischer Mikrosysteme erfüllt werden. Der analytisch-numerische Ansatz erreichte in der Simulation einen durchschnittlichen theoretischen Winkelfehler im Bereich von 10^{-8}° und einen Positionsfehler von durchschnittlich 10^{-10} m bei einer Berechnungszeit von ca. 4 Sekunden pro Position. Der genetische Optimierungsalgorithmus berechnete die Spiegelwinkel mit einer Genauigkeit von 10^{-6} Grad und deren Mittelpunkt mit einem Fehler von durchschnittlich 10^{-6} m. Die dafür benötigte Rechenzeit lag im Durchschnitt bei zwei bis drei Minuten. *Der analytisch-numerische Algorithmus ist folglich deutlich leistungsfähiger als das genetische Optimierungsverfahren.* Dessen ungeachtet hängt die Wahl der Methode von den konkreten Randbedingungen im Anwendungsfall ab. Dennoch ist davon auszugehen, dass in den meisten Fällen das analytisch-numerische Modell vorzuziehen ist, da die Montagesysteme im Normalfall auf die Sensorik eingestellt und so kalibriert werden können, dass die in Abschnitt 6.3.2.2 entwickelte Initialraumkonfiguration angewendet werden kann.

Im folgenden Kapitel werden anhand eines Versuchsaufbaus, der die Montage eines Mikrosensors abbildet, beide Methoden validiert und die Algorithmen unter Realbedingungen getestet.

7 Validierung der Methoden und Simulationen

7.1 Anwendungsbeispiel Mikroscanner für Laservibrometer

7.1.1 Demonstrator

Die dargestellten Methoden zur laserbasierten Bauteillagebestimmung von Mikrospiegeln wurden anhand der Positionierung eines Mikrokippspiegels bei der Montage eines Mikroscanners validiert. Dieser Mikrospiegel-basierte Scanner wurde ausgewählt, da seine Montage Herausforderungen mit sich bringt, die für optische Mikrosysteme typisch sind. Diese Herausforderungen werden in Abschnitt 7.1.2 näher beleuchtet.

Der Mikroscanner, im Folgenden auch Strahlumlenkeinheit oder μ -Positionsreflektor genannt, wurde im Projektverbund ForPhoton, dem das Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, das iwb – Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften und die Firma Amitronics angehören, gemeinsam entwickelt und prototypisch umgesetzt. Das Entwicklungsvorhaben wurde von der Bayerischen Forschungsförderung gefördert.

Der Bedarf für einen Mikroscanner zur Strahlauslenkung bei der lasergestützten Schwingungsmessung geht auf die Arbeiten der Firma Amitronics auf diesem Gebiet zurück.

Amitronics setzt Laservibrometer für Schwingungsmessungen an nahezu allen Strukturen von mikroelektronischen Baugruppen und Fahrzeugkomponenten ein. Insbesondere bei Messungen an Sensoren im Motorraum von Fahrzeugen ist der direkte optische Zugang zur Messfläche nicht immer gegeben. Gegenwärtig werden von Amitronics statische, manuell eingestellte Spiegel zur Strahlumlenkung verwendet. Die Größe dieser Spiegel und der Aufwand bei deren Feinjustage führen zu starken Einschränkungen des Messfelds und der Arbeitsgeschwindigkeit. Ein Messen in engen Hohlräumen oder im Schatten von Hinterschneidungen ist mit der derzeit vorhandenen Technik nicht möglich. Vor diesem Hintergrund entstand die Idee, eine hochgenaue, automatisch einstellbare Positionierungseinrichtung für den Laserstrahl eines Vibrometers zu entwickeln.

Durch die Analyse des geplanten Einsatzbereichs der Strahlumlenkeinheit konnten folgende Anforderungen an den Prototypen des Scanners ermittelt werden:

- Miniaturisierung der Positioniereinheit, um auch in kleinen Bauräumen messen zu können (max. $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$).
- Möglichst große Reflexionsfläche der Schwingungsspiegel (mindestens $2 \times 2 \text{ mm}^2$).

7 Validierung der Methoden und Simulation

- Kompakte Bauweise der Ansteuerelektronik der Spiegel.
- Spiegelneigung in zwei Richtungen elektronisch steuerbar und statisch wiederholgenau einstellbar (Repositionierung, Laserrückführung).
- Einfach montierbar (z.B. über Stativ und direkt an der Struktur in unmittelbarer Nähe des Messobjekts) und dabei schwingungstechnisch vom Messobjekt entkoppelt.
- Keine Temperaturdrift oder alternativ eine Temperaturkompensation.

Basierend auf diesen Anforderungen wurde durch das Fraunhofer IZM und das *iwb* eine Mikrosystem-basierte Lösung zur Strahlauslenkung entwickelt und aufgebaut. Bild 7-1 zeigt die Prototypen der ein- und zweiachsigen Varianten der Strahlumlenkeinheit.

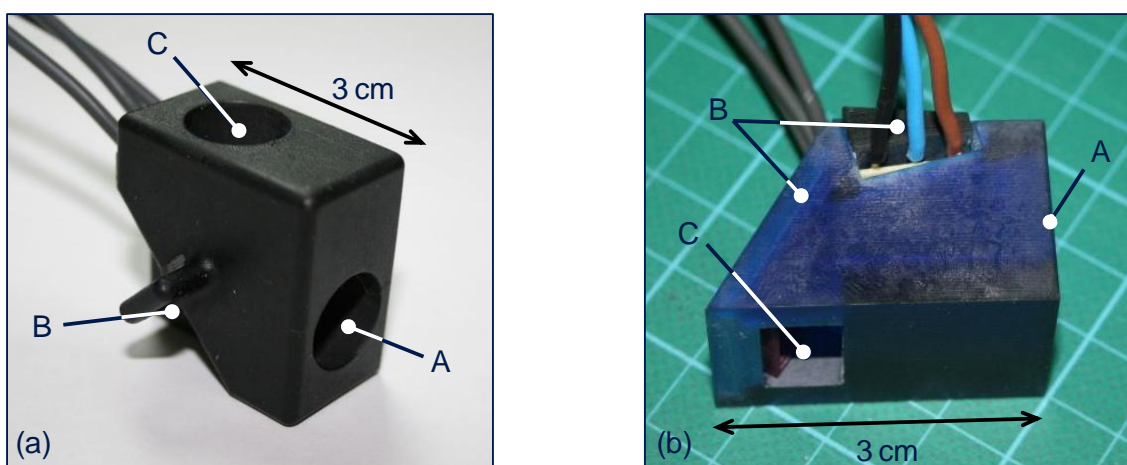


Bild 7-1: Mikroscooper für Laservibrometer: (a) einachsige Variante; (b) zweiachsige Variante (Fraunhofer IZM, *iwb*)

Während des Betriebs des Vibrometers wird der Laserstrahl durch die Eintrittsöffnung (A) in das System eingekoppelt und im Inneren durch einen (Einachseinheit) oder zwei (Zweiachseinheit) einachsige bewegliche Mikrospiegel (B) ausgelenkt. Der Strahl tritt dann durch die Öffnung (C) aus der Umlenkeinheit aus. Der Laser kann so über beliebige Flächen innerhalb des entstehenden Projektionskegels gerastert werden. Bild 3-2 (s. Seite 47) zeigt einen CAD-Halbschnitt des Mikroscoopers, der die Anordnung der Mikrospiegel zueinander und den systeminternen Verlauf des Laserstrahls darstellt.

Der am Messobjekt reflektierte Strahl muss den Mikroscooper in umgekehrter Richtung passieren können, um eine Schwingungsmessung durch das Vibrometer zu ermöglichen. Die Spiegel im Inneren der Strahlumlenkeinheit müssen deshalb während der Vermessung eines Punkts für kurze Zeit statisch in einer Position gehalten werden. Kardanisch aufgehängte Spiegel können nicht eingesetzt werden. Sie verfügen entweder über zu kleine Spiegelflächen oder können nur oszillierend in Resonanz betrieben werden. Zur Auslenkung des Laserstrahls werden daher elektrostatisch angesteuerte,

7.1 Anwendungsbeispiel Mikros scanner für Laservibrometer

einachsrig auslenkbare Mikrospeigel verwendet, die am Fraunhofer IZM in Chemnitz entwickelt und gefertigt wurden (Bild 7-2).

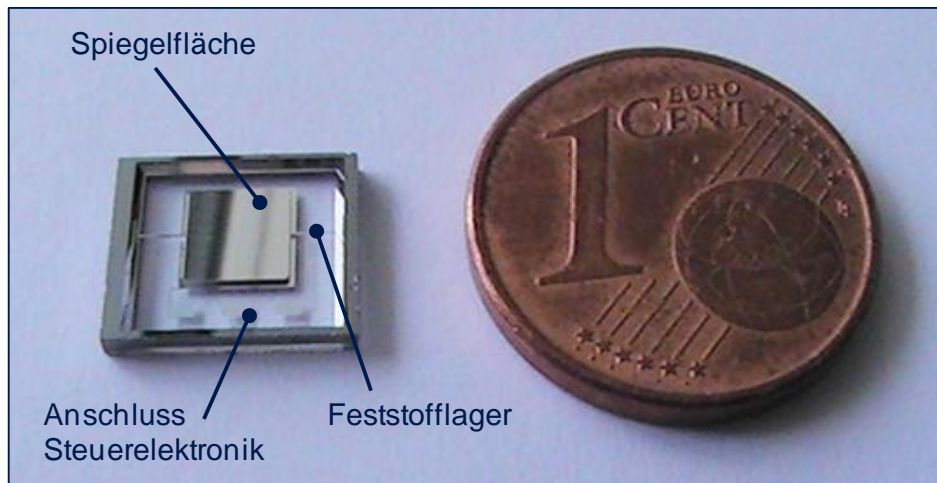


Bild 7-2: Einachsrig auslenkbarer Mikrospeigel

7.1.2 Montageaufgabe

Der Zusammenbau des Mikros scanners erfordert die Montage der Einachs-Mikrospeigel in eine Kunststoffträgerstruktur. Im Vorfeld werden die monolithisch gefertigten Mikrospeigel zur Kontaktierung auf Leiterplatten aufgebracht und zusammen mit einem Epoxidharzrahmen auf diese geklebt. Wegen des funktionsbedingt dreidimensionalen Strahlengangs müssen die Mikrospeigelbaugruppen bei der Montage in sechs räumlichen Freiheitsgraden gehandhabt und relativ zueinander positioniert werden (*Positionierung in sechs räumlichen Freiheitsgraden*, vgl. Abschnitt 3.2.1).

Die Funktionsweise der Strahlumlenkeinheit erfordert eine präzise Ausrichtung der Spiegel zueinander mit einer Genauigkeit von unter $10\ \mu\text{m}$ in alle Achsrichtungen und unter $0,05^\circ$ in allen Raumwinkeln. Die Mikrospeigelbaugruppen werden von außen in die Trägerstruktur eingebracht, justiert und verklebt (Bild 7-3 a). Fertigungsungenauigkeiten vorheriger Prozessschritte, wie beispielsweise der Materialschwund beim Abkühlen nach dem „Rapid-Prototyping“ der Trägerstruktur oder Toleranzen beim Kleben der Rahmen auf die Mikrospeigelplatine, müssen bei der Montage der Spiegel ausgeglichen werden. Ziel ist es, die Spiegel achsfluchtend zum Laserstrahl auszurichten (*Detektion fügeferner Positionsreferenzen*, vgl. Abschnitt 3.2.3).

Die funktionsrelevanten und daher für die Positionierung interessanten Strukturen sind die Spiegelflächen selbst. Diese sind bei der Montage mit herkömmlichen optischen Sensoren nicht erfassbar, da die Rückseiten der Spiegelträger und die darüber liegenden Elektronikplatinen deren Kontur verdecken. Auch von der Unterseite ist die Detektion der Spiegelfläche während der Positionierung nicht möglich, da die Trägerstruktur dies verhindert. Die Ansicht eines teilweise montierten Mikros scanners [Bild

7 Validierung der Methoden und Simulation

7-3 (b)] verdeutlicht die schlechte Zugänglichkeit der Spiegelflächen bei der Montage (*Eingeschränkte optische und taktile Zugänglichkeit*, vgl. Abschnitt 3.2.2).

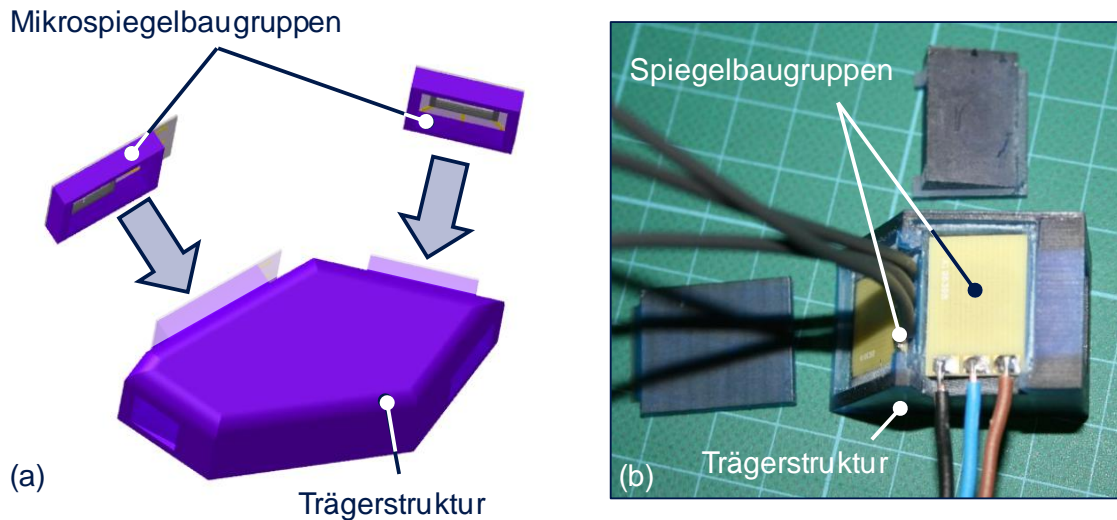


Bild 7-3: Fügeoperationen bei der Montage des Mikrosanners: (a) Fügerichtungen im CAD-Modell; (b) Rückansicht der montierten Spiegelbaugruppen

Ein weiteres Problem stellen die Toleranzen der vormontierten Spiegelbaugruppen dar. Bild 7-4 zeigt ein Modell der Mikroskopspiegelbaugruppe mit Messpunkten und dem Koordinatenursprung. Letzterer orientiert sich an den aufgedampften Leiterbahnen der Trägerplatte (Bild 7-4, 0). Das Fertigungsverfahren, mit dem diese Bahnen aufgebracht werden, führt zu extrem geringen Toleranzen der Positionen der Leiterbahnen. Sie eignen sich deshalb besonders gut als Koordinaten- bzw. Referenzursprung.

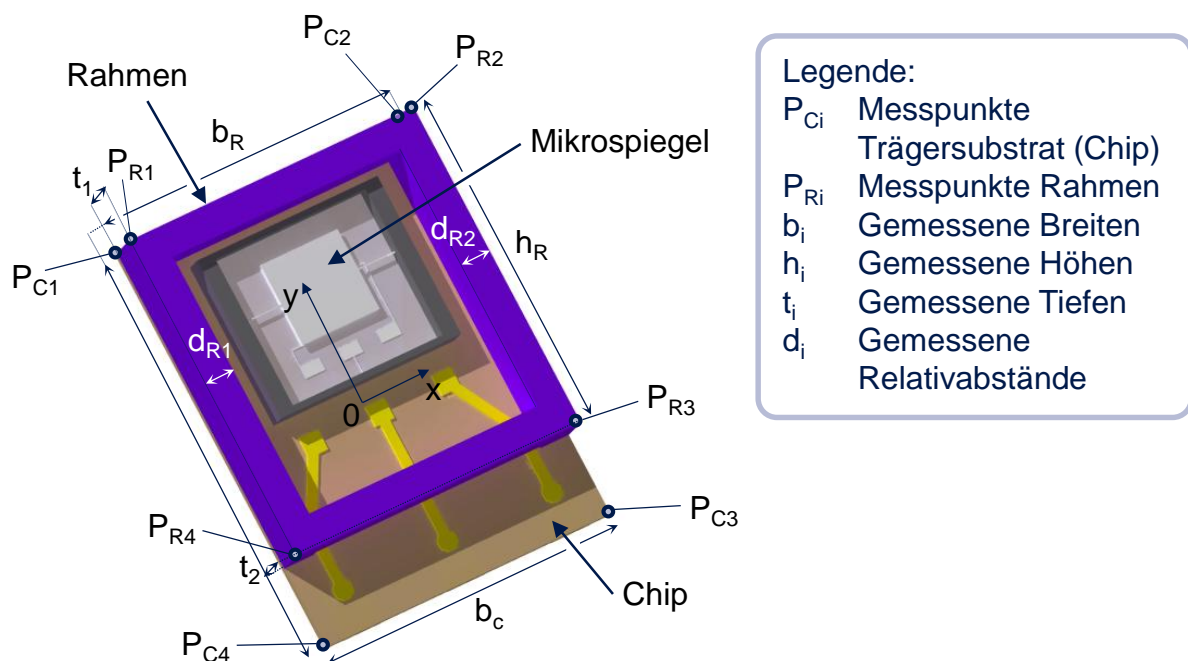


Bild 7-4: Baugruppe aus Trägersubstrat, Mikroskopspiegel und Rahmen mit Messpunkten und Referenzmarken

7.1 Anwendungsbeispiel Mikros scanner für Laservibrometer

Alle 50 verfügbaren Mikrospiegel- und Dummy-Baugruppen wurden berührungslos mit einem Nikon Messmikroskop MM 40 und einem Koordinatenmesstisch vom Typ Metronics® Quadra Check 200 (max. Auflösung 0,1 μm) vermessen. Die Messungen ergaben in Abhängigkeit vom Referenzmaß eine Standardabweichung der geometrischen Maßhaltigkeit optisch erfassbarer Rückseitenumrisstrukturen von bis zu 48 μm in x-Richtung und 18 μm in y-Richtung. In Bild 7-5 sind die Toleranzverteilungen der Koordinaten des Punkts P_{C1} dargestellt. Dieser Punkt ist beispielhaft für die chipfesten Punkte P_{Ci} , die die Außenkontur der Baugruppenrückseite definieren. Sowohl taktile als auch Kamera-basierte Sensoren nutzen diese zur Bauteillagebestimmung.

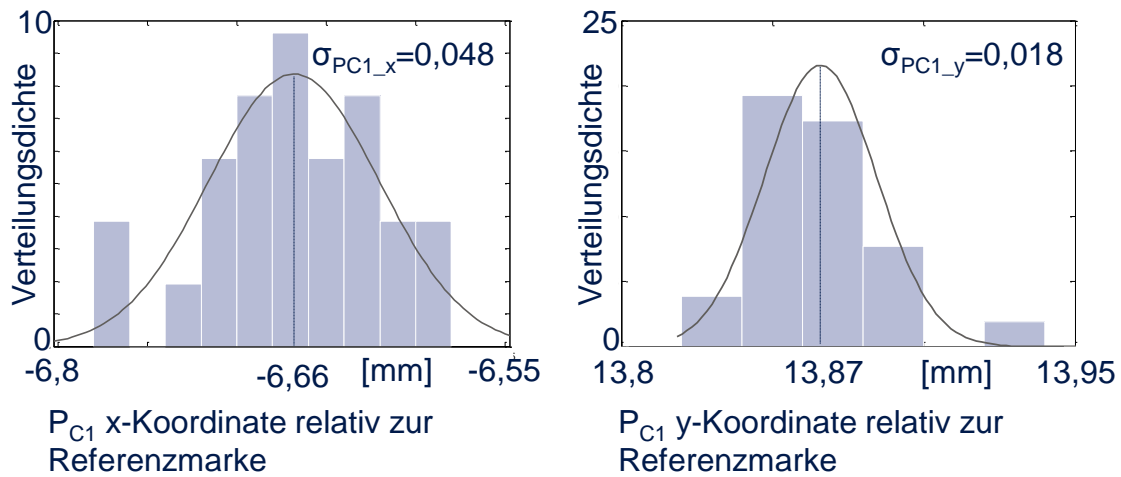


Bild 7-5: Streuung der x- und y-Koordinaten des ersten Referenzpunkts P_{C1} der Baugruppenkomponente „Chip“

Die Referenzmarken der Baugruppenkomponente „Rahmen“ (P_{Ri}) weisen sogar eine Standardabweichung in x-Richtung von maximal 95 μm und in y-Richtung von bis zu 170 μm auf (Bild 7-6).

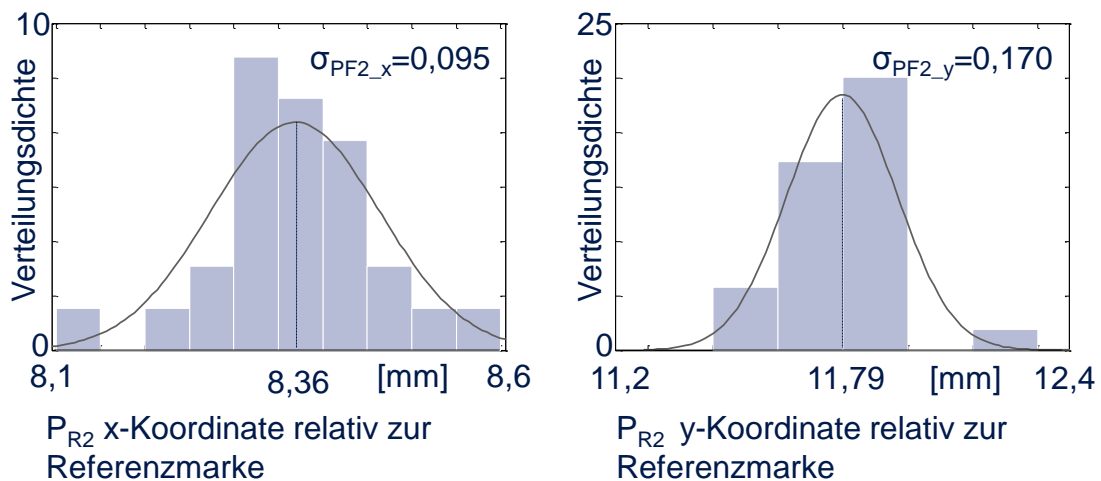


Bild 7-6: Streuung der x- und y-Koordinaten des zweiten Referenzpunkts der Baugruppenkomponente „Rahmen“

Die Rahmenstruktur dient zwar lediglich dem Schutz des Mikrospiegels und ist damit nicht funktionsrelevant, ihre Position beeinflusst jedoch die Außenkontur der Baugruppe.

Bedingt durch die hohen Toleranzen in der Baugruppe aus Trägersubstrat, Mikrospiegel und Rahmen muss die Position des Mikrospiegels direkt und unabhängig von den anderen Komponenten der Baugruppe erfasst werden. Existierende Sensorsysteme versagen hier. So verhindern die hohen Abweichungen entlang der Außenkontur beispielsweise eine auf Bildverarbeitung basierende Erkennung der Spiegel. Des Weiteren können Referenzmarken auf der Basisplatte der Mikrospiegelbaugruppen wegen der großen Toleranzen innerhalb der Baugruppen nicht zur Positionsbestimmung genutzt werden (vgl. HÖHN 2001). Das Epoxidharz Amethyst, aus dem die meisten Produktkomponenten gefertigt sind, ist im gesamten Wellenlängenspektrum lichtundurchlässig, weshalb Durchlichtsysteme ebenfalls nicht infrage kommen (vgl. HEIMBACH 2003). Ein weiteres Sensorkonzept sieht vor, zuerst eine Teleskop-Optik zwischen die Fügepartner einzubringen, diese dann zueinander auszurichten, die Optik herausziehen und die Bauteile schließlich „blind“ zu fügen (JACOB 2002). Auch diese Methode lässt sich nicht einsetzen, da der Mikrospiegel nicht relativ zur Trägerstruktur, sondern zum Laserstrahl ausgerichtet werden muss. Dies verhindert auch den Einsatz von 3D-Objektiven (vgl. BÜTTGENBACH ET AL. 2006). Mehrstrahlinterferometer scheidet aufgrund der totalreflektierenden Eigenschaften der Spiegeloberfläche und den Winkelstellungen der Spiegel im Produkt aus (vgl. PÖSCHEL ET AL. 2006). Auch andere, gängige Sensorsysteme (vgl. Kapitel 2) sind nicht geeignet die Position der Mikrospiegelbaugruppe ausreichend genau zu detektieren. Die Montage des Mikroscanners für Laservibrometer eignet sich daher hervorragend zur Validierung der Laserreflexiven Positionierung.

7.2 Versuchsstand

7.2.1 Grundlegender Aufbau

Zur Validierung der gezeigten Berechnungs- und Simulationsmodelle zur Positionierung von Mikrokippspiegeln (vgl. Kapitel 6) wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der alle für die Laserreflexive Positionierung notwendigen Komponenten umfasst. Dazu gehören eine Laserquelle, eine Präzisionskinematik zur Positionierung der Spiegelbaugruppe, die Spiegelbaugruppe selbst und ein Sensor zur Erfassung des zweidimensionalen Laserreflexionsmusters. Bild 7-7 zeigt den Versuchsstand. Der Strahlengang des Lasers wurde schematisch als Linie zwischen Faseraustritt, Spiegelbaugruppe und PSD-Sensor in das Bild eingefügt.

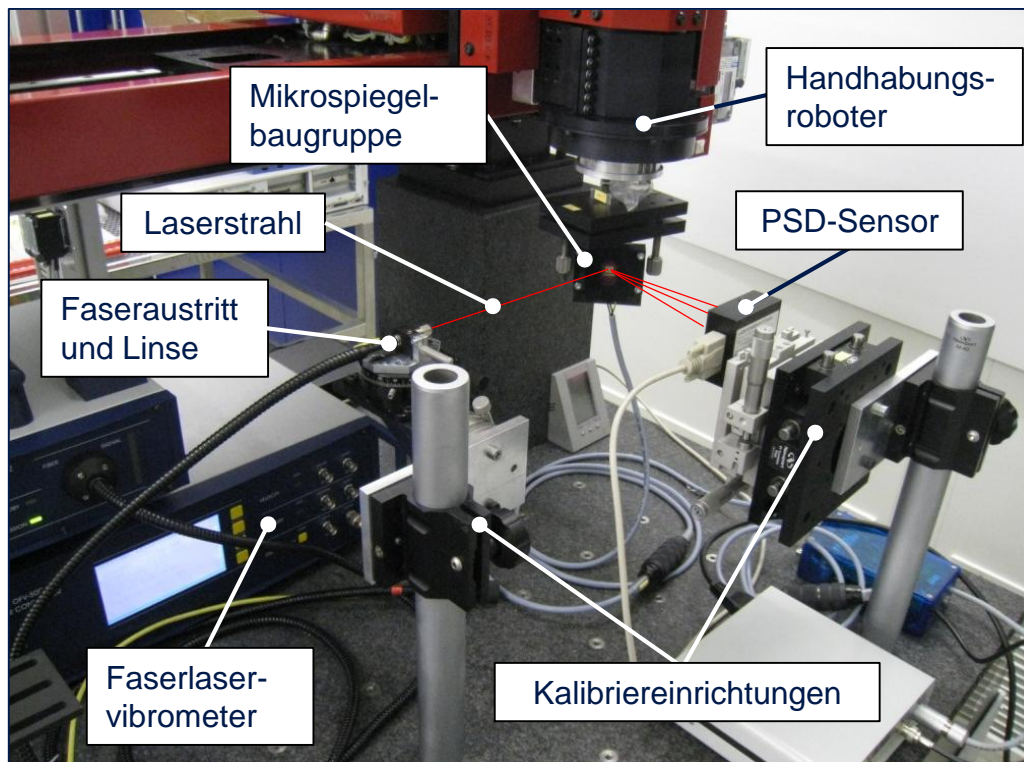


Bild 7-7: Versuchsstand zur Laserreflexiven Positionierung

Bei der Laserquelle handelt es sich um ein Faserlaservibrometer (LVM) vom Typ OFV-552 der Firma Polytec, genauer um einen TEM_{00} Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda_1 = 660 \text{ nm}$ (POLYTEC 2010). Der Vorteil dieser Laserquelle liegt in ihrem geringen Strahlparameterprodukt und ihrem großen fokalen Bereich. Die Strahlqualität des Lasers ist dementsprechend hoch und stellt einen langen, zur Messung geeigneten Fokusbereich sicher (vgl. Abschnitt 4.1). Die Laserlaufänge im Versuchsstand zur LRP beträgt ca. 300 mm. Durch die Fokussierung der Linse am Faseraustritt des Lasers wird innerhalb des Messbereichs ein Strahldurchmesser von $51 \mu\text{m}$ erreicht.

Zur Erfassung des Laserreflexionsmusters wurde im Versuchsstand ein duolateraler, gekapselter PSD-Sensor der Firma Hamamatsu verbaut. Aufgrund der Gauß'schen Intensitätsverteilung des im Versuchsstand eingesetzten TEM_{00} Lasers lässt sich durch einen PSD-Sensor der im Vergleich zur Zielmessgenauigkeit große Strahldurchmesser kompensieren. Ein PSD-Sensor misst immer den Ort der höchsten Strahlintensität, er erfasst damit exakt den Strahlmittelpunkt des Messlasers. Aus diesem Grund ist ein PSD-Sensor zur LRP deutlich besser geeignet als ein CCD-Sensor. Weitere Vorteile sind hohe Messraten und eine einfache Auswertung (vgl. Abschnitt 4.2). In Kombination mit einem Signalverstärker des Typs On-Track® OT-301 erreicht der verwendete PSD-Sensor eine Auflösung von 250 nm (HAMAMATSU 2003).

Im Versuch ermöglichte der Präzisionsroboter der Firma Sysmelec (Typ: Autoplace 411) die automatisierte Positionierung des Spiegels mit einer Genauigkeit von $1 \mu\text{m}$

7 Validierung der Methoden und Simulation

(SYSMELEC 2009). Am Endeffektor des Roboters wurde für den Versuch eine Spiegelbaugruppe befestigt, die mit jenen im Mikros scanner identisch ist. Diese wurde mit der Steuerelektronik des Versuchsstands verbunden, wodurch die Spiegelkinematik entsprechend der mechatronischen Montage angesteuert werden konnte. Für den im Mikros scanner verbauten Mikrospeigel des Fraunhofer IZM war die in Bild 7-8 dargestellte Kennlinie für den Zusammenhang zwischen Steuerspannung und Spiegelwinkel gegeben.

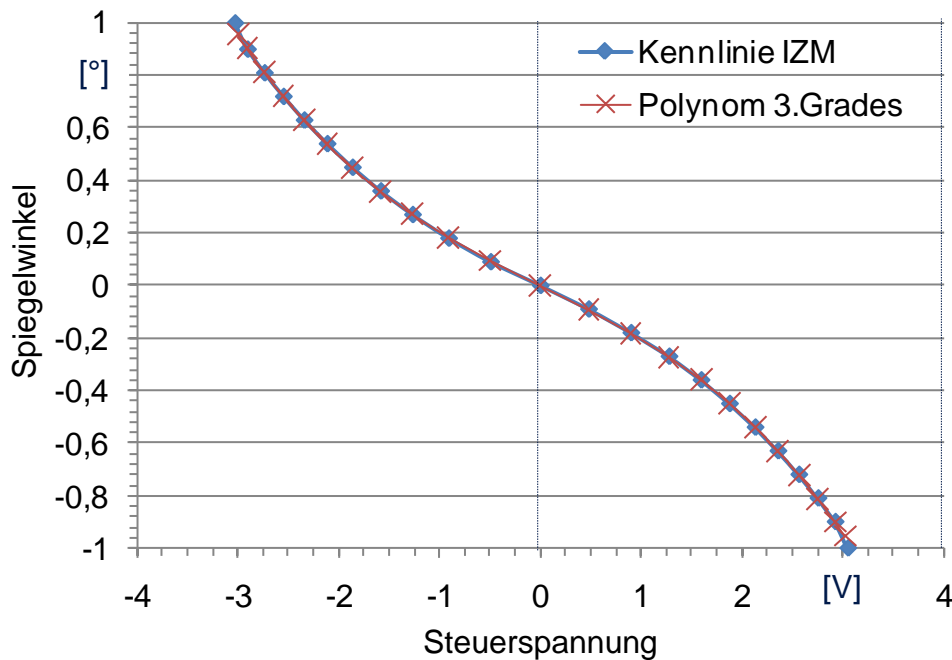


Bild 7-8: Kennlinie des Spiegelwinkels in Abhängigkeit von der Steuerspannung und die Näherung der Kennlinie durch ein Taylorpolynom

Die Kurve kann sehr gut durch ein Polynom dritten Grades der Form

$$\varepsilon(U_s) = -0,0139 * U_s^3 + 0,0007207 * U_s^2 - 0,1909 * U_s - 0,000899 \quad (7.1)$$

angenähert werden. Auf Basis dieser Funktion konnte die Steuerungssoftware des Versuchsstands die für einen vorgegebenen Spiegelwinkel $\varepsilon(U_s)$ benötigte Steuerspannung U_s für den Verstärker der Spiegelaktorik berechnen. Im zur Validierung eingesetzten Versuchsstand wurde die Schnittstelle zwischen Spiegel und Montagesystem aus systemtechnischen Gründen stoffschlüssig umgesetzt. Für Versuche im Prototypenstadium konnte damit eine höhere Verfügbarkeit und Robustheit des Versuchsstands gewährleistet werden. Möglichkeiten zur technischen Umsetzung der mechatronischen Montage für die LRP werden in Abschnitt 8.1 näher betrachtet.

Alle Komponenten des Versuchsstands wurden auf einer Granitplatte befestigt und von der Umgebung schwingungsentkoppelt. Die Fokussiereinheit des Lasers sowie der PSD-Sensor wurden zur Kalibrierung außerdem auf manuellen Mikropositioniereinheiten der Firma Newport montiert. Angesteuert wurden alle

Komponenten über einen PC. Die Kommunikation zum Präzisionsroboter wurde über eine RS-232 Schnittstelle realisiert, PSD und Laservibrometer wurden über eine digital-analoge Schnittstellenkarte der Firma National Instruments integriert. Ein vereinfachter Überblick über die Steuerungsarchitektur des Versuchsstands ist in Bild 7-9 dargestellt.

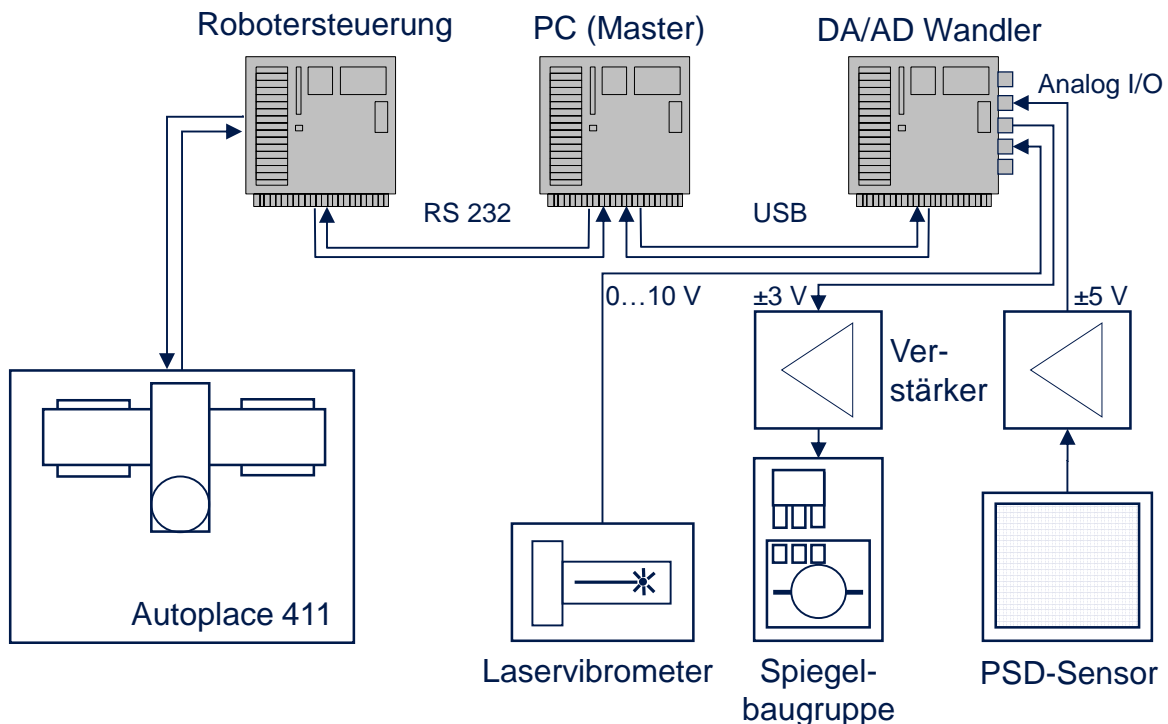


Bild 7-9: Steuerungsarchitektur des Versuchsstands

Zur Steuerung des Versuchsstands wurde eine Lösung auf Basis der Entwicklungsumgebung LabView entwickelt und umgesetzt. Die entwickelte Steuerungssoftware nutzt den proprietären DAQ-Treiberbaustein der Firma National Instruments für die Kommunikation mit dem Digital-Analog/Analog-Digital-Wandler (DA/AD-Wandler) des Versuchsstands. LabView verfügt außerdem über eine Schnittstelle zur Programmierumgebung MatLab, die der Steuerungssoftware des Versuchsstands zur Integration der Algorithmen für die LRP dient.

7.2.2 Kalibrierung und Fehlerkompensation

Vor der Versuchsdurchführung müssen sowohl der Laser als auch der PSD kalibriert werden. Dafür muss

- die Fokusslage des Lasers eingestellt,
- die Verstärkung des PSD-Signals der Strahlintensität des Lasers angepasst,
- der Laserstrahl parallel zur x-Achse des Roboters ausgerichtet und
- die Sensorfläche des PSD normal zur y-Achse des Roboters positioniert werden.

7 Validierung der Methoden und Simulation

Der Fokus des Lasers lässt sich mit der Optik am Faseraustritt des Laservibrometers auf den gewünschten Arbeitsabstand einstellen. Letzterer kann über eine Referenzfahrt des Roboters mit einer Genauigkeit von $1\ \mu\text{m}$ ermittelt werden.

Die korrekte Einstellung der Verstärkung des PSD-Signals lässt sich durch einen Testbeschuss ermittelt. Dazu wird der Messlaser auf die Sensorfläche fokussiert und die Verstärkerleistung so angepasst, dass ein analoger Ausgangswert von 10 Volt erreicht wurde.

Die Ausrichtung des Lasers parallel zur x-Achse des Roboters (Bild 7-10) wird mithilfe des PSD-Sensors durchgeführt, der dafür am Tool-Center-Point (TCP) des Roboters montiert wird. Der Roboter wird entlang seiner x-Achse verfahren, parallel dazu wird das durch den Laser auf dem PSD erzeugte Signal abgetastet. Der Laser wird dann manuell mit Präzisionskippeinheiten justiert, bis über die vom Roboter zurückgelegte Strecke kein Versatz des Laserpunkts mehr messbar ist.

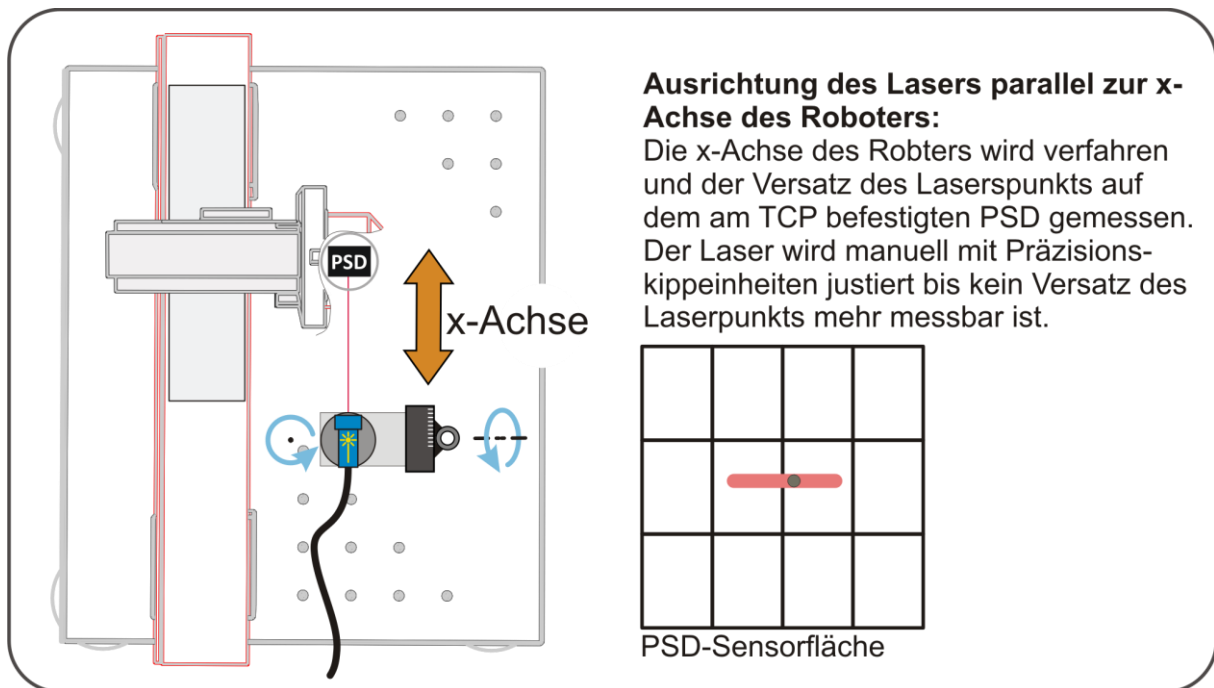


Bild 7-10: Positionskalibrierung der LRP-Komponenten, Schritt 1

Auf die Ausrichtung des Messlasers folgt die Kalibrierung der Position des PSD-Sensors. Vor der Positionierung des Sensors wird in einem Zwischenschritt ein statischer Spiegel am TCP des Montageroboters befestigt (Schritt 2). Dieser wird durch eine interferometrische Dreipunktmessung zuerst orthogonal zum Laser ausgerichtet und dann mithilfe der z-Achse des Roboters um 45° gedreht. Die Winkelgenauigkeit liegt entsprechend der Roboterspezifikation bei $0,001^\circ$. So wird eine Laserumlenkung um $90^\circ \pm 0,001^\circ$ erreicht (Bild 7-11).

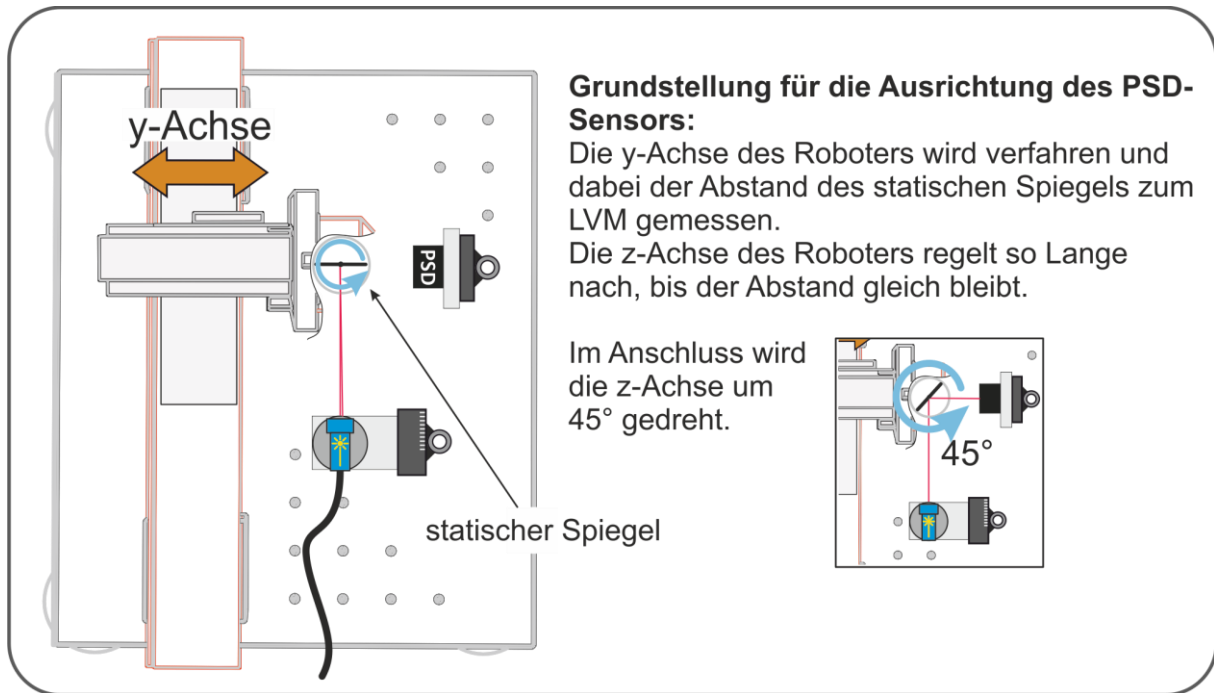


Bild 7-11: Positionskalibrierung der LRP-Komponenten, Schritt 2

Nach der statischen Einstellung des Lasers wird die Position des PSD-Sensors eingerichtet (Schritt 3). Dafür wird der Sensor über manuelle Präzisionsachsen verfahren. Ähnlich dem Vorgehen bei Schritt 2 wird dann eine Dreipunkt-Abstandsmessung mit Hilfe des Laservibrometers (LVM) durchgeführt. Bei gleichen Abständen der Punkte vom Kopf des LVM liegt die PSD-Fläche senkrecht zum Laserstrahl. Die Justage der PSD-Neigung erfolgt über manuelle Präzisionskippeinheiten, an denen der PSD befestigt ist (Bild 7-12).

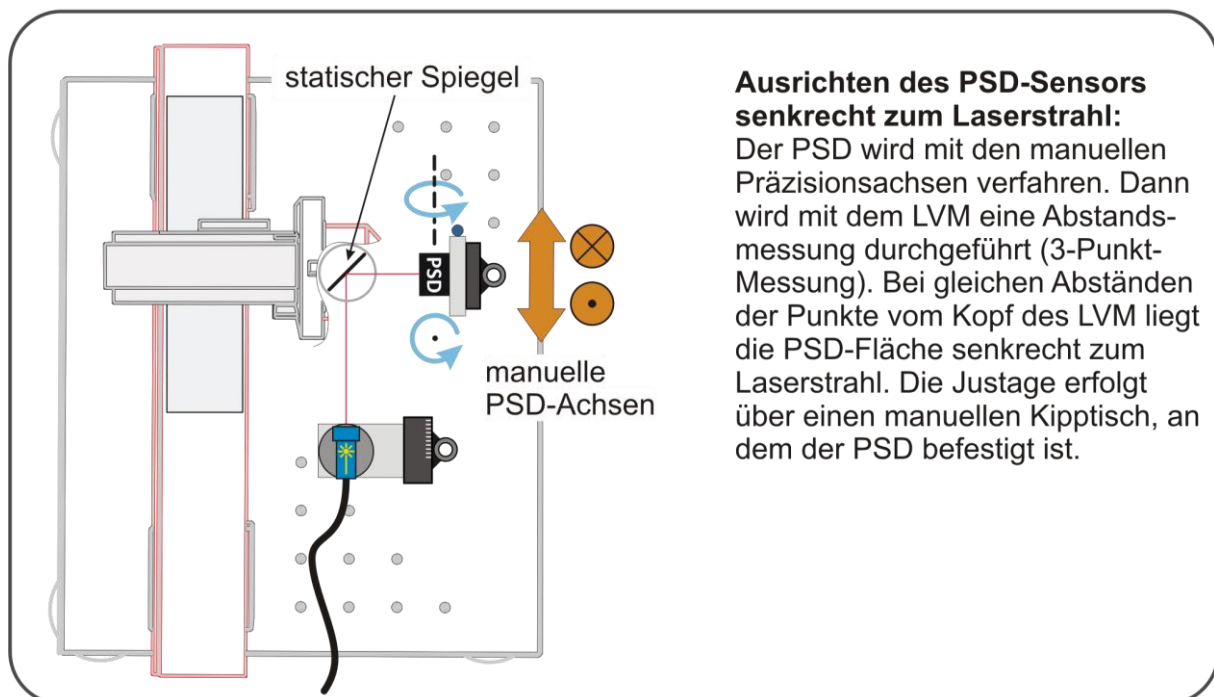


Bild 7-12: Positionskalibrierung der LRP-Komponenten, Schritt 3

7 Validierung der Methoden und Simulation

Die erreichbare Genauigkeit der Kalibrierung hängt vom Abstand der Messpunkte und der Relativgenauigkeit des LVM ab. Das im Versuchsstand eingesetzte LVM misst mit einer Genauigkeit von 10 Pikometern. Dieser Wert liegt weit über den Genauigkeiten der eingesetzten Achsen, die im μm -Bereich liegen, und ist höher als für die Kalibrierung des Versuchsstands erforderlich. Für alle Elemente konnte mit der vorgestellten Methode eine maximale Abweichung von den Idealachsen im Bereich von 10^{-3} Grad erreicht werden.

Die Kalibrierung der Position und Orientierung von Laser und PSD-Sensor sind für die Versuchsdurchführung besonders wichtig. Sie dienen der Kompensation von Abbe-Fehlern im Versuchsstand. Bei allen Kalibrierungsschritten werden die manuell einzustellenden Korrekturwerte von der Steuerungssoftware des Versuchsstands berechnet und dem Nutzer angezeigt. Nach jeder manuellen Feineinstellung führt das Steuerungssystem automatisch eine neue Messung durch und empfiehlt ggf. eine Nachkorrektur. In die Steuerungssoftware wurden spezielle Module implementiert, die die für die Kalibrierungsschritte benötigten Funktionen in einer Benutzeroberfläche zusammenfassen. Bild 7-13 zeigt exemplarisch die Oberfläche des Kalibrierungs-Moduls „Ausrichtung Laser“.

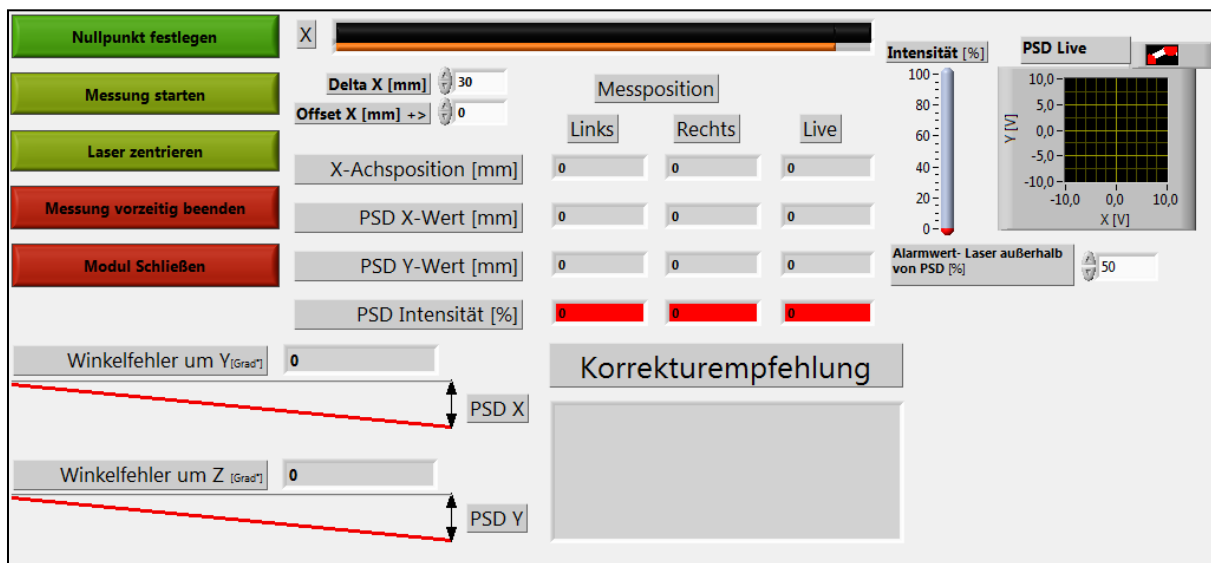


Bild 7-13: Kalibrierungsmodul „Ausrichtung Laser“ der Versuchssteuerung

Die Nullposition des Spiegels im kalibrierten Versuchsstand ist so festgelegt, dass der Laser exakt in der Mitte des Spiegels auftrifft und um 90° in der x-y-Ebene ausgelenkt wird. Für die folgenden Versuche wird die Nullposition als Optimalposition bzw. Montageposition definiert.

7.3 Positionierungsversuche

7.3.1 Validierung der Reflexionsmusterberechnung

Vor der Untersuchung der zur Laserreflexiven Positionierung entwickelten Algorithmen muss geprüft werden, ob das Simulationsmodell, das zur theoretischen Analyse der Algorithmen herangezogen wurde (vgl. Abschnitt 6.2), das reale Reflexionsmuster ausreichend genau abbildet. Darüber hinaus muss durch einen Abgleich der Simulation mit den Messdaten das reale Verhalten des Spiegels und dessen Einfluss auf das Reflexionsmuster ermittelt werden.

Eine Referenzmessung des Reflexionsmusters in Spiegelnulldstellung mit einem maximalen Oszillationswinkel von $\pm 1^\circ$ und insgesamt 21 quasi-statischen Stützstellen ergibt das in Bild 7-14 gezeigte Sensorbild. Das simulierte Reflexionsmuster ist zum Vergleich ebenfalls in Bild 7-14 dargestellt.

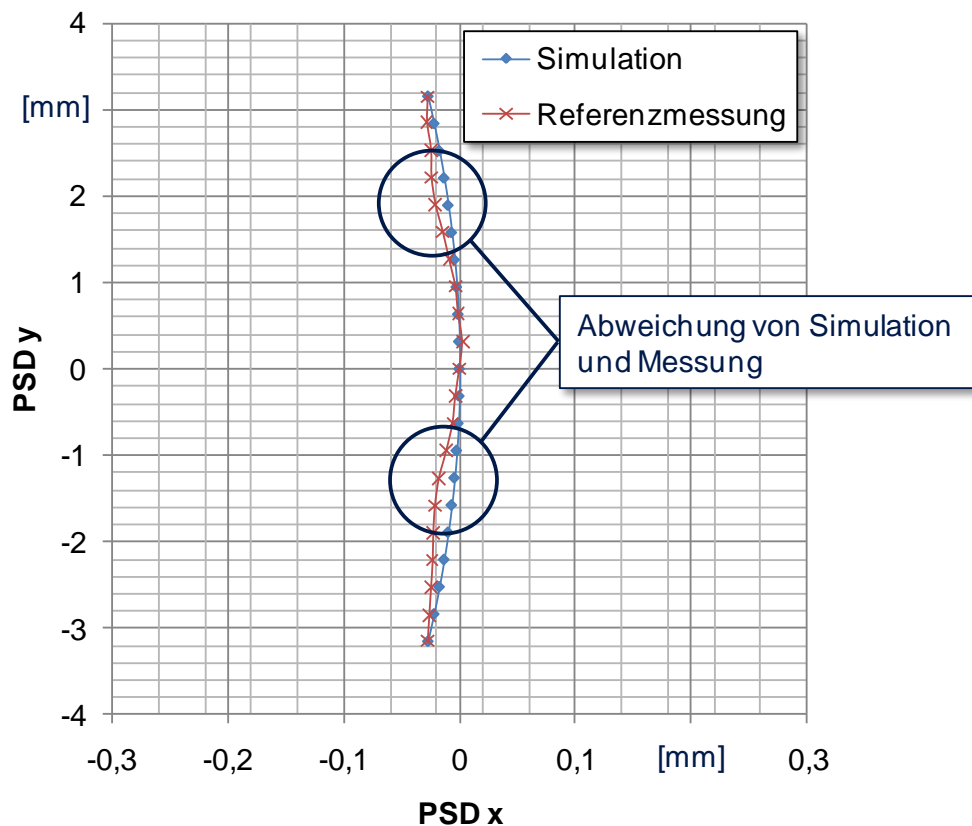


Bild 7-14: Vergleich des Referenzmusters mit der Simulation

Als Eingangsgrößen für die Simulation wurden die bei der Kalibrierung vermessenen geometrischen Daten des Versuchsstands genutzt. Tabelle 7-1 fasst die geometrischen Größen des Versuchsstands bezogen auf das Laserkoordinatensystem zusammen. Nullpunkt dieses Referenzkoordinatensystems ist der Ursprungspunkt des Lasers (Fa-

7 Validierung der Methoden und Simulation

seraustritt), die x-Achse entspricht der Ausbreitungsrichtung des Lasers, die z-Achse zeigt senkrecht nach oben. Die y-Achse bildet mit den beiden anderen Achsen ein Rechtssystem.

Größe	Wert
Ursprungspunkt des Lasers P_l	$P_l = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} mm$
Vektor des Laserstrahls \vec{v}_l	$\vec{v}_l = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
Mittelpunkt des Spiegels P_s	$P_s = \begin{pmatrix} 150,002 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} mm$
Eulerwinkel 1 des Spiegels α_s	-90°
Eulerwinkel 2 des Spiegels β_s	-135°
Eulerwinkel 3 des Spiegels γ_s	90°
Normalenvektor des Spiegels \vec{n}_s	$\vec{n}_s = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Drehachse des Spiegels \vec{d}_s	$\vec{d}_s = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Maximale Winkelamplitude ε_s	$\pm 0,7^\circ$
Mittelpunkt des PSD-Sensors P_d	$P_d = \begin{pmatrix} 150,002 \\ 181,958 \\ 0 \end{pmatrix} mm$
Normalenvektor des PSD-Sensors \vec{n}_d	$\vec{n}_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Tabelle 7-1: Geometrische Größen des kalibrierten Versuchsstands

Im Vergleich zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Muster an den Scheitelpunkten und im Nulldurchgang. Die maximale Abweichung zwischen Simulation und Messung liegt an diesen Punkten zwischen $0,75 \mu m$ und $1,0 \mu m$. Allerdings tritt im Bereich zwischen Nulldurchgang und Scheitelpunkten eine zur Nullstellung symmetrische Abweichung der simulierten Sensorwerte von den real gemessenen Werten von bis zu $20,75 \mu m$ auf (Bild 7-14, gekennzeichnete Bereiche). Über insgesamt 50 Messungen war das Reflexionsmuster auch über mehrere Kalibrierungsvorgänge sehr gut reproduzierbar. Eine Abweichung zwischen Simulation und Messung aufgrund stochastischer Einflüsse oder Kalibrierungsfehler kann somit ausgeschlossen werden.

Ebenso wenig ist die Ausbauchung des gemessenen Reflexionsmusters durch optische Effekte zu erklären, denn die Versuche wurden in einem abgedunkelten Raum im optisch homogenen Medium Luft bei konstanter Temperatur durchgeführt. Auch das Verstärkerausgangssignal der Steuerelektronik zeigte keine Auffälligkeiten in der Steuerspannung.

Als Ursache für die Verzerrung des Reflexionsmusters konnten vielmehr strukturdynamische Effekte in der Feststofflagerung des Spiegels identifiziert werden. Wie in Bild 7-2 zu erkennen ist, ist aufgrund der großen Fläche des Scan-Spiegels das Verhältnis zwischen der bewegten Masse des Spiegels und der Steifigkeit der Lagerstege sehr ungünstig. Zudem ist die Kraft der elektrostatischen Aktorik proportional zur Aktorfläche auf der Spiegelunterseite, da diese Fläche als Aktorelektrode genutzt wird. Beim Versuch konnte daher davon ausgegangen werden, dass der Spiegel neben der Rotation um seine Drehachse auch eine translatorische, reproduzierbare Verschiebung erfährt. Eine Überprüfung durch das Mikro-Mechatronik Zentrum (MMZ) des Fraunhofer IZM ergab eine Spiegelverschiebung in Normalenrichtung von bis zu $2,5 \mu\text{m}$ (Bild 7-15). Die Untersuchungen des MMZ zeigten außerdem, dass eine Verwindung der Spiegelfläche durch die Kraft der Aktorik nicht ausgeschlossen werden kann.

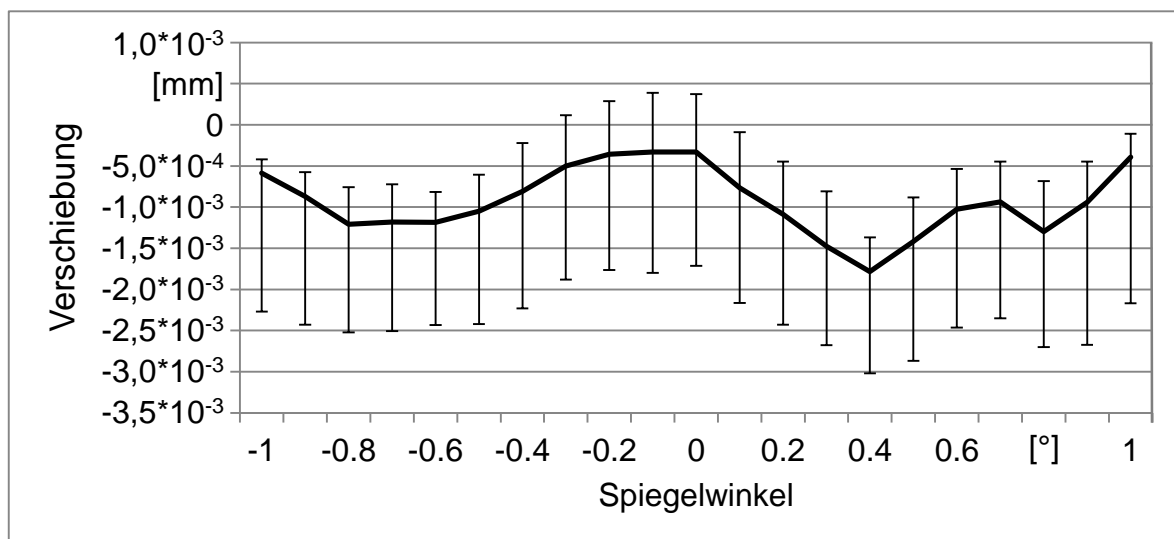


Bild 7-15: Verschiebung des Spiegels in Normalenrichtung

Die Berücksichtigung der Information über die Spiegelverschiebung durch eine diskrete, winkelabhängige Transversalbewegung der Spiegelfläche im Simulationsmodell, führte zu einer deutlich besseren Übereinstimmung der Reflexionsmuster von Simulation und Messung. Der maximale Abstand der gemessenen Musterstützpunkte zu den simulierten lag nach der Anpassung des Simulationsmodells nur noch bei $8,1 \mu\text{m}$, der durchschnittliche Fehler bei $5,5 \mu\text{m}$. Die Maximalabweichung der Muster an der Stelle des Nulldurchgangs und an den Scheitelpunkten betrug lediglich $2,9 \mu\text{m}$ bei einem mittleren Fehler von $2,3 \mu\text{m}$. Der bestehende Restfehler ist auf Kalibrierungsunge-

7 Validierung der Methoden und Simulation

naugigkeiten und Toleranzen des Versuchsaufbaus zurückzuführen. Da diese Einflüsse messtechnisch nicht erfassbar sind, kann das Simulationsmodell nicht weiter angepasst werden. Bild 7-16 zeigt die Sensordaten der angepassten Simulation und die der Referenzmessung.

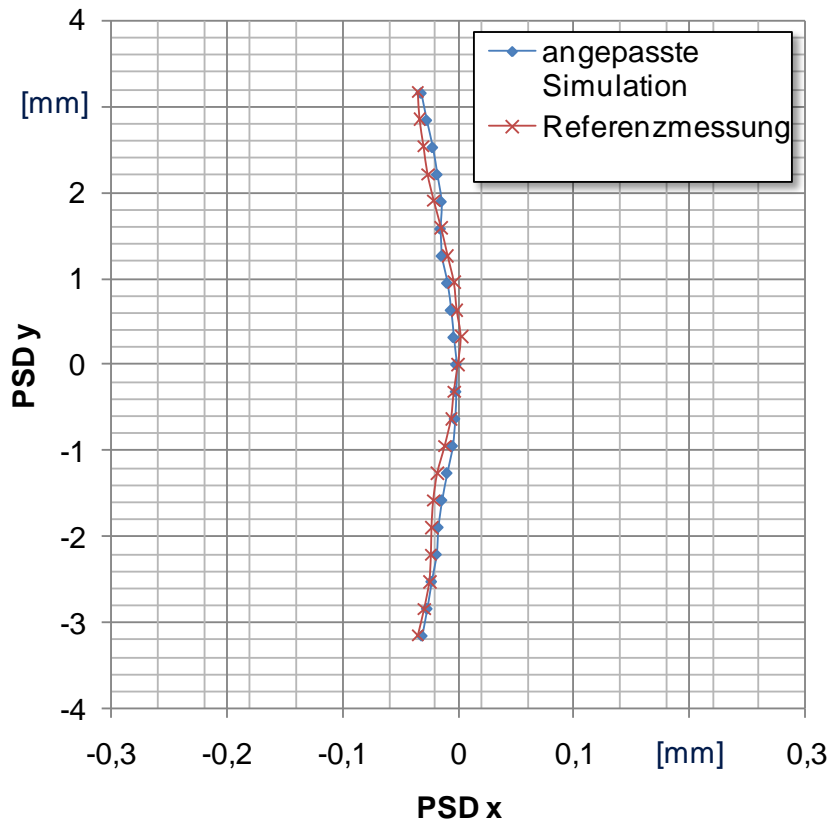


Bild 7-16: Vergleich des Referenzmusters mit der angepassten Simulation

Die geringen Abweichungen von Simulation und Messung zeigen, dass das Modell zur Reflexionsmusterberechnung auf Basis der geometrischen Optik das reale Systemverhalten sehr gut abbildet. Die Simulation ist damit für die allgemeine Analyse des Reflexionsmusters und des Verhaltens der Algorithmen (vgl. Kapitel 6) geeignet. Lediglich die Annahme einer idealen Rotationsbewegung ist für die im Mikroskanner eingesetzten Spiegel nicht zulässig.

7.3.2 Integration der Algorithmen

Bei der Validierung der Algorithmen zur Laserreflexiven Positionierung soll deren Genauigkeit, Stabilität und Rechenzeit bei der Positionierung eines Mikrokippspiegels während Montage eines Mikroskanners untersucht werden. Bevor die Algorithmen zur Bauteilpositionierung genutzt und analysiert werden können, müssen sie in die Steuerungsarchitektur des Versuchsstands integriert werden.

Dazu wird der analytisch-numerische Algorithmus seriell in die Prozesskette zur Positionierung eingekoppelt (Bild 7-17). Zu Beginn eines Versuchs stellt die Versuchs-

steuerung mithilfe der Präzisionsachsen, ausgehend von der Referenzposition, eine bekannte Spiegelposition ein. Zu dieser Position wird dann ein Reflexionsmuster generiert. Die durch den PSD erfassten Daten des Reflexionsmusters werden von der Steuerungssoftware des Versuchsstands ausgelesen und als Eingangsgrößen über die Schnittstelle LabView-MatLab an den Algorithmus weitergegeben. Der Algorithmus berechnet dann, basierend auf den Musterdaten, die Position des Spiegels und gibt das Ergebnis an die Steuerungssoftware des Versuchsstands zurück. Die Position wird daraufhin mit der voreingestellten Position des Spiegels verglichen und die Abweichung zwischen tatsächlicher und berechneter Position ermittelt. Zur Bestimmung der voreingestellten IST-Position werden die Werte der Achs-Encoder des Sysmelec Präzisionsroboters ausgelesen und die Position des Spiegelmittelpunkts relativ zum kalibrierten Nullpunkt berechnet.

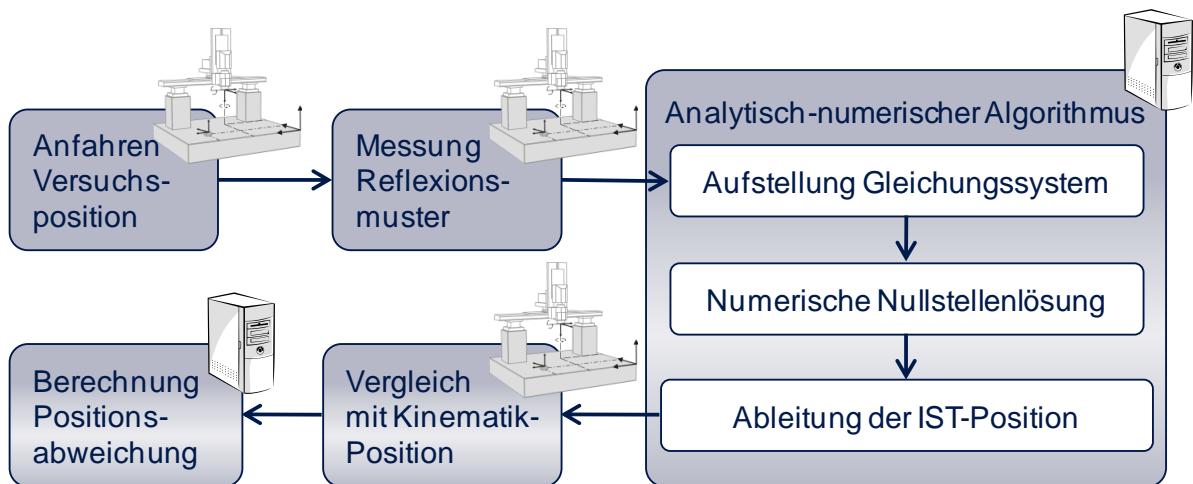


Bild 7-17: Integration des analytisch-numerischen Algorithmus

Die in Abschnitt 7.3.1 beschriebene Störbewegung des Spiegels spielt bei der Integration des analytisch-numerischen Algorithmus keine Rolle. Zur Berechnung nutzt dieser Algorithmus nur die Nullstelle und die Scheitelpunkte einer Spiegelschwingung. An diesen Punkten liegt ein vernachlässigbar kleiner Störhub des Spiegels in Normalenrichtung vor (Bild 7-15). An diesen Stellen stimmt auch das Reflexionsmuster, das mit dem nicht angepassten Simulationsmodell berechnet wurde, sehr gut mit dem gemessenen Reflexionsmuster überein. Das analytische Übertragungsmodell innerhalb des analytisch-numerischen Algorithmus musste für den Versuch deshalb nicht angepasst werden.

Der evolutionäre Algorithmus lässt sich im Gegensatz zur analytisch-numerischen Lösung nicht einfach seriell in den Versuchsstand integrieren. Zur Lageoptimierung werden im Zuge des evolutionären Vorgehens viele verschiedene Positionen durch methodische Mutation und Fortpflanzung „ausprobiert“. Bei einer Zielfitness von $F = 10^9$ mm² benötigt der Algorithmus im Mittel etwa 680 Generationen bis ein Individuum mit ausreichender Güte gefunden ist. Bei Populationsgrößen von $\mu = 6$ und

7 Validierung der Methoden und Simulation

$\lambda = 8 * \mu = 48$ Individuen entspricht dies etwa 32.000 erzeugten Individuen. In der Simulation am Rechner ist die Berechnungsdauer von etwa ein bis zwei Minuten ausreichend kurz (vgl. Abschnitt 6.3.3.5). In der praktischen Anwendung stellt die hohe Zahl an Individuen jedoch ein Problem dar. So würde es sehr lange dauern, jedes Individuum mit der Roboterkinematik abzufahren, um die entsprechenden Reflexionsmuster zu messen. Im Versuch wurde die evolutionäre Optimierung deshalb mit dem Simulationsmodell zur Berechnung des Strahlengangs gekoppelt (Bild 7-18). Das Reflexionsmuster eines Individuums kann so innerhalb des Steuerungsrechners ermittelt und dessen Fitness deutlich schneller bewertet werden als bei einer realen Messung der Musterdaten.

Wie bei der Validierung des analytisch-numerischen Algorithmus wird zu Beginn eines Versuchs mithilfe der Präzisionsachsen eine bekannte Spiegelposition eingestellt. Die durch den PSD erfassten Musterdaten werden von der Steuerungssoftware des Versuchsstands ausgelesen und als Eingangsgrößen über die Schnittstelle LabView-MatLab an den Algorithmus weitergegeben. Als Ausgangsposition für die Optimierung wird die Referenzposition gewählt mit dem Ziel, die aktuelle IST-Position des Spiegels zu finden. Wählt man als Zielmuster das gemessene IST-Muster, entspricht das Individuum mit der besten Fitness der aktuellen Position der Spiegelbaugruppe. Die Variablen des besten Individuums werden abschließend als berechnete Position an die Steuerung des Versuchsstands zurückgegeben und mit der tatsächlichen Position verglichen.

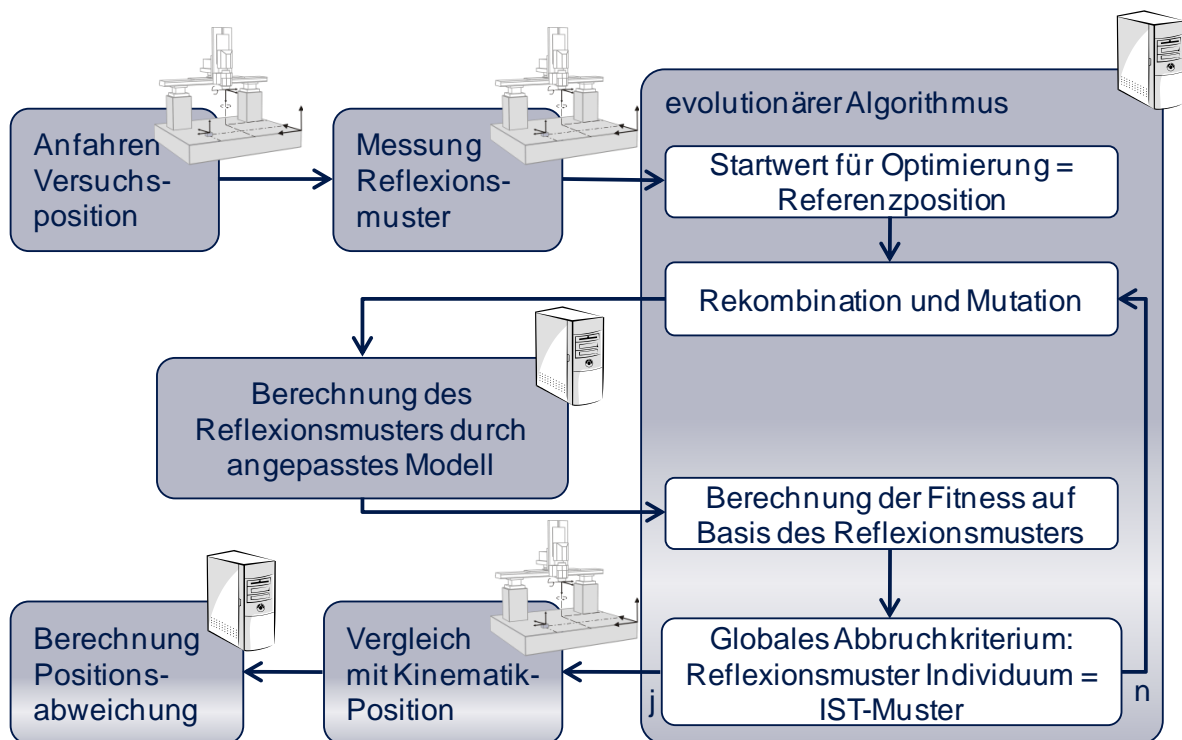


Bild 7-18: Integration des evolutionären Algorithmus in den Versuchsstand

Der evolutionäre Algorithmus nutzt zur Bestimmung der Fitness im Versuch 21 Stützpunkte, die gleichmäßig über das Reflexionsmuster verteilt sind. Die Störbewegung des Spiegels beeinflusst deshalb das Ergebnis der Optimierung. Aus diesem Grund wurde zur Berechnung Reflexionsmusters im Versuchsstand das in Abschnitt 7.3.1 angepasste Modell eingesetzt. Der evolutionäre Algorithmus selbst bleibt unverändert.

7.3.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

7.3.3.1 Positionierung mit dem analytisch-numerischen Algorithmus

Der analytisch-numerische Algorithmus wurde, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, für die Validierungsversuche direkt in die Architektur des Versuchsstands integriert. Zur Untersuchung der Stabilität, der Berechnungszeit pro Position und der Positioniergenauigkeit des Algorithmus wurden zwei unterschiedliche Versuchsreihen durchgeführt. Im ersten Versuch wurden die Roboterachsen isoliert betrachtet. Dabei wurde der Spiegel entlang der Achsen um jeweils $\pm 0,1$ mm translatorisch (x, y, z) und $\pm 0,1^\circ$ rotatorisch (z_{rot}) aus seiner Nullposition verfahren. Die nicht ausgelenkten Achsen waren dabei auf den Wert der Spiegelnullposition eingestellt. Die zweite Versuchsreihe umfasste insgesamt 20 unterschiedliche, zufällige Positionen im Intervall $x, y, z \in [-0,1; 0,1]$ mm, $z_{rot} \in [-0,1; 0,1]^\circ$. Bei den Versuchen, in denen Positionen entlang einzelner Achsen untersucht wurden, wurden zehn Berechnungen pro Position durchgeführt. Bei Versuchen, die zufällige Positionen und damit eine Überlagerung mehrerer Achsen abbildeten, wurden fünf Ergebnisse pro Position berechnet. Ziel der mehrfachen Berechnungen war es, die Stabilität und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bewerten zu können.

Die Ergebnisse der Versuche, in denen Positionierungen entlang der einzelnen Freiheitsgrade des Roboters durchgeführt wurden, sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst. Der analytisch-numerische Algorithmus erreichte bei einer Verschiebung entlang einzelner Roboterachsen eine über alle Positionen gemittelte Genauigkeit von translatorisch $\Delta(xyz)_{DK} \leq 4,8 \mu\text{m}$ (DK-Fehler) und rotatorisch $\Delta\alpha \leq 0,8 * 10^{-3}^\circ$. Damit erfüllt er die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit bei der Montage optischer Mikrosystemkomponenten. Auch die im Anwendungsbeispiel bei der Montage des Mikrosanners geforderte Genauigkeit von $\Delta(xyz)_{DK} \leq 10 \mu\text{m}$ und $\Delta\alpha \leq 0,1^\circ$ wird erreicht. Die Berechnungszeit lag durchschnittlich bei 5,51 Sekunden pro Position.

7 Validierung der Methoden und Simulation

Spiegelposition (relativ zur Nullposition)						Fehler	
x [mm]	y [mm]	z [mm]	θ [°]	φ [°]	δ [°]	Winkelfehler [°]	Positionsfehler $\Delta(xyz)_{DK}$ [mm]
0,1	0	0	180	135	0	0,0076	0,0062
-0,1	0	0	180	135	0	0,0081	0,0096
0	0,1	0	180	135	0	0,0005	0,0040
0	-0,1	0	180	135	0	0,0012	0,0027
0	0	0,1	180	135	0	0,0024	0,0026
0	0	-0,1	180	135	0	0,0015	0,0020
0	0	0	180	134,9	0	0,0041	0,0070
0	0	0	180	135,1	0	0,0025	0,0044

Tabelle 7-2: Genauigkeiten des analytisch-numerischen Algorithmus bei der Positionierung entlang einzelner Roboterachsen

Bei der Positionsänderung einzelner Achsen überlagern sich die Ungenauigkeiten mehrerer Achsen nicht. Der Algorithmus muss dabei nicht so robust arbeiten, wie bei einer Bauteilpositionierung, die zeitgleich mehrere Achsen betrifft. Deshalb bildet die zweite Versuchsreihe sowohl Überlagerungseffekte als auch freie Bauteilpositionen ab.

Die zweite Versuchsreihe bestätigte die guten Ergebnisse der ersten Positionierungen mit isolierten Achsverschiebungen. Über die Berechnungen aller 20 Positionen konnte ein mittlerer, absoluter Fehler von $\Delta(xyz)_{DK} \leq 4,94 \mu\text{m}$ translatorisch und $\Delta\alpha \leq 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ$ rotatorisch erreicht werden. Die Genauigkeitsanforderungen aus der Montage optischer Mikrosystemkomponenten werden demnach auch bei zufälliger Wahl der Bauteilposition erfüllt. Die Berechnungszeit über alle Positionen lag bei durchschnittlich 17,8 Sekunden. Der Algorithmus konvergierte in jedem Versuch gegen einen im Berechnungsverlauf konstanten Zielwert. Bild 7-19 fasst die Ergebnisse der Positionierungsversuche zusammen und gibt einen Überblick über die Fehlerverteilung im Versuch. Für die Angabe der Konfidenzintervalle wurde für das Ergebnis eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $P_f = 0,5 \%$ vorausgesetzt (vgl. Abschnitt 6.3.2.5).

Die im Vergleich zu den theoretischen, mathematischen Untersuchungen schlechteren Genauigkeitswerte und die längere mittlere Berechnungszeit sind auf die Toleranzen im Versuchsstand und die damit verbundenen Abweichungen von gemessenem Muster zu Idealmuster zurückzuführen (vgl. Abschnitt 6.3.2).

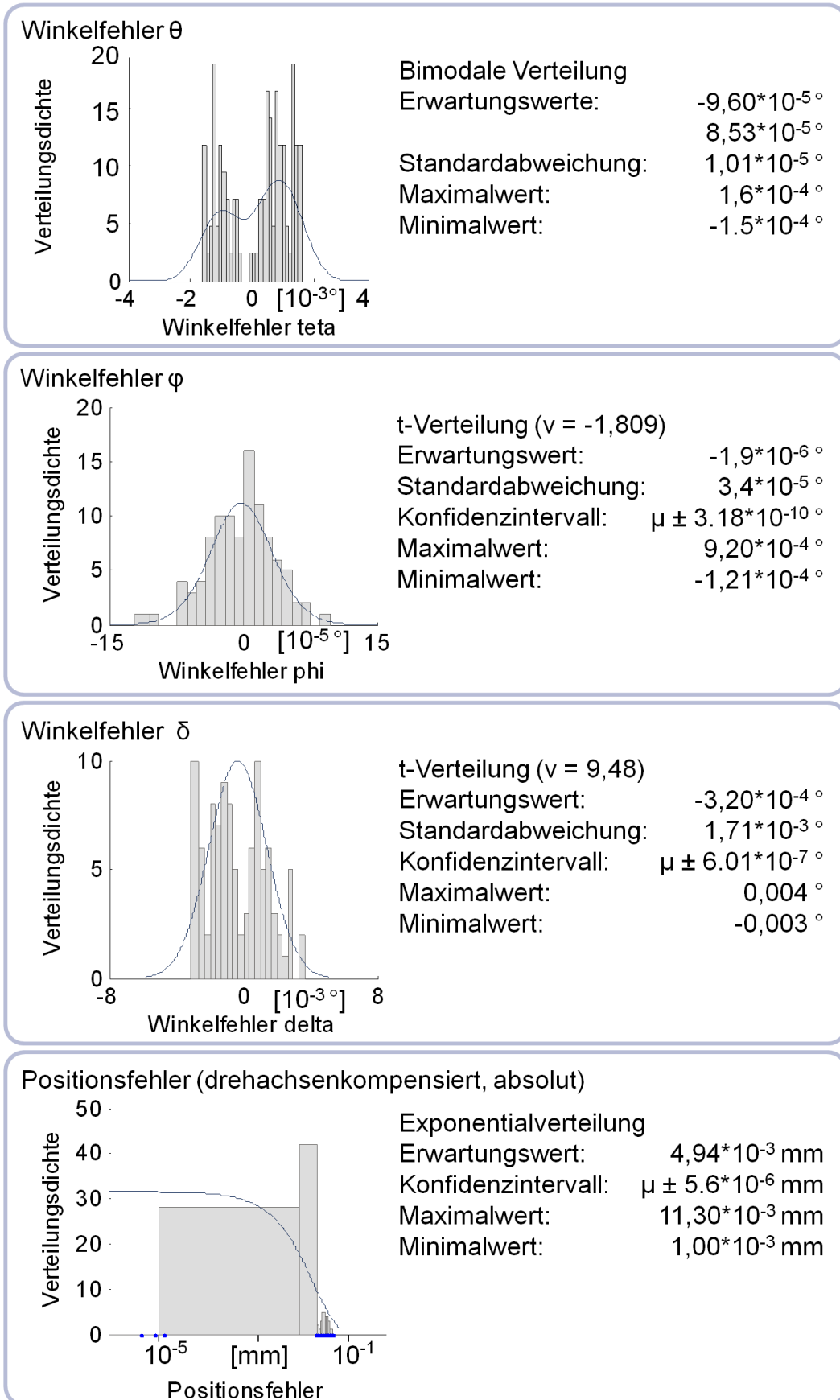


Bild 7-19: Verteilungen der Positionsfehler aus den Versuchen zur LRP auf Basis des analytisch-numerischen Algorithmus

7 Validierung der Methoden und Simulation

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Laserreflexiven Positionierung auf Basis des analytisch-numerischen Algorithmus sehr gut für die Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten eignet. Die Versuche zeigen, dass der analytisch-numerische Algorithmus in der praktischen Anwendung eine stabile und hochgenaue Berechnung der Bauteilposition ermöglicht. Sowohl die Positioniergenauigkeit als auch die Rechenzeit erfüllen die Anforderungen der Mikromontage.

7.3.3.2 Positionierung mit dem evolutionären Algorithmus

Die Validierung der Laserreflexiven Positionierung mittels genetischer Optimierung wurde mit der in Abschnitt 7.3.2 dargestellten Versuchsarchitektur zur Integration des evolutionären Algorithmus durchgeführt (Bild 7-18). Zur Bestimmung der Spiegelposition wurde der evolutionäre Algorithmus mit dem angepassten Simulationsmodell zur Reflexionsmusterberechnung gekoppelt. Erste Versuche zeigten, dass die zum Erreichen einer Zielfitness von $F = 10^{-9} \text{ mm}^2$ benötigte Rechenzeit in etwa zwanzig Mal so hoch ist wie bei der simulationsgestützten, theoretisch-mathematischen Validierung des Algorithmus (vgl. Abschnitt 6.3.3.5). Bei einigen Positionierungsvorgängen konnte die Zielfitness nicht erreicht werden. Dieses Verhalten lässt sich auf drei wesentliche Ursachen zurückführen. Erstens grenzt der Zielfitnesswert von $F = 10^{-9} \text{ mm}^2$ an den Bereich des Messrauschens der PSD-Auswerteelektronik (vgl. Abschnitt 7.2.1). Zweitens kommt es bei der Kalibrierung des Versuchsstands zu einer sich entlang der Toleranzkette summierenden, nicht messbaren Abweichung von Laserposition, optimalem Spiegelnullpunkt und der Position des PSD-Sensors (vgl. Abschnitt 7.2.2). Drittens weicht das gemessene Reflexionsmuster aufgrund der Kalibrierungsfehler und des nicht idealen Spiegelverhaltens vom simulierten Reflexionsmuster ab. Da der evolutionäre Algorithmus 21 Musterstützpunkte zur Positionsbestimmung nutzt, wirkt sich die Musterabweichung wesentlich stärker auf Positionsgenauigkeit, Stabilität und Rechenzeit aus als bei der analytisch-numerischen Methode. Letztere verwendet nur den Nulldurchgang und die beiden Scheitelpunkte des Reflexionsmusters. In diesen drei Punkten ist der Simulationsfehler sowohl pro Punkt als auch kumuliert deutlich geringer (vgl. Abschnitt 7.3.1). Zur weiteren experimentellen Validierung des evolutionären Algorithmus wurde daher zusätzlich zum Grenzfittenswert eine Generationenanzahl von $n_{G_max} = 5000$ als zweites Abbruchkriterium definiert.

Mit diesen Modifikationen wurden insgesamt 75 Positionsberechnungen durchgeführt. Über alle Versuche betrug die durchschnittliche Winkelgenauigkeit $\Delta\alpha = 4,13 * 10^{-3} \text{ }^\circ$ und die gemittelte translatorische Genauigkeit $\Delta(xyz)_{DK} = 0,046 \text{ mm}$. Tabelle 7-3 zeigt im Überblick die mittleren Positionsfehler über alle Positionierungsversuche. Zur Berechnung der Bauteilpositionen benötigte der evolutionäre Algorithmus im Mit-

tel 4.610 Generationen und erreichte eine Fitness von durchschnittlich $6,19 \cdot 10^{-8}$ mm². Bei der verwendeten Hardware betrug die maximale Rechenzeit etwa 15 Minuten pro Positionierung.

Parameter Spiegelposition	Mittlerer Absolutfehler [mm]	Standardabweichung [mm]	Maximaler Fehler [mm]	Mittelwert Relativfehler [mm]
α [°]	$1,614 \cdot 10^{-6}$	$8,910 \cdot 10^{-7}$	$3,229 \cdot 10^{-6}$	$-2,522 \cdot 10^{-7}$
β [°]	$6,295 \cdot 10^{-4}$	$1,080 \cdot 10^{-3}$	$8,358 \cdot 10^{-3}$	$1,142 \cdot 10^{-4}$
γ [°]	$1,175 \cdot 10^{-2}$	$6,321 \cdot 10^{-3}$	$2,202 \cdot 10^{-2}$	$-1,877 \cdot 10^{-3}$
x [mm]	$4,323 \cdot 10^{-2}$	$2,833 \cdot 10^{-2}$	$1,000 \cdot 10^{-1}$	$-7,352 \cdot 10^{-6}$
y [mm]	$4,427 \cdot 10^{-2}$	$3,165 \cdot 10^{-2}$	$1,534 \cdot 10^{-1}$	$7,357 \cdot 10^{-4}$
z [mm]	$5,276 \cdot 10^{-2}$	$2,839 \cdot 10^{-2}$	$9,881 \cdot 10^{-2}$	$8,426 \cdot 10^{-3}$
DK-Fehler	$6,789 \cdot 10^{-2}$	$3,770 \cdot 10^{-2}$	$1,966 \cdot 10^{-1}$	-

Tabelle 7-3: Durchschnittliche Positionsfehler des evolutionären Algorithmus im Versuch

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit bei der Montage des Mikrosanners nur teilweise erfüllt wurden (vgl. Abschnitt 7.1.2). Die erzielten Winkelgenauigkeiten zwischen durchschnittlich $1,61 \cdot 10^{-6}$ ° (α) und $1,18 \cdot 10^{-2}$ ° (γ) liegen unter den geforderten $0,05$ ° und damit im Soll-Bereich. Die durchschnittlichen absoluten, translatorischen Positionsfehler befinden sich im Intervall zwischen $43,2$ µm (x) und $52,8$ µm (y). Die translatorische Zielgenauigkeit von $\Delta_{max}(xyz)_{DK} \leq 10$ µm wird damit nicht erreicht.

Durch die Einführung einer maximalen Generationenanzahl als zusätzliches Abbruchkriterium konnte im Versuch keine Zielfitness garantiert werden. Die Übereinstimmung der realen Messwerte mit dem Projektionsmuster der ermittelten Spiegelposition schwankt stark. Die Standardabweichung des erreichten Fitnesswerts liegt bei $3,2 \cdot 10^{-7}$ mm². Dieser im Vergleich zur durchschnittlich erreichten Zielfitness sehr hohe Wert ist auf einzelne, sehr ungenaue Berechnungen zurückzuführen, die durch den Abbruch der Positionierung bei 5.000 Generationen verursacht wurden.

Eine Möglichkeit, die Positioniergenauigkeit zu erhöhen, ist die mehrfache Anwendung des Genetischen Algorithmus auf eine einzelne Position. Bild 7-20 zeigt exemplarisch die Verteilung der Fehler bei der Bestimmung von drei unterschiedlichen Positionen mit 15 Berechnungen pro Position. Zu sehen ist, dass der relative Fehler gleichmäßig in negativer und positiver Richtung streut. Bei mehreren wiederholten Positionsberechnungen gleichen sich die Fehler dadurch aus.

7 Validierung der Methoden und Simulation

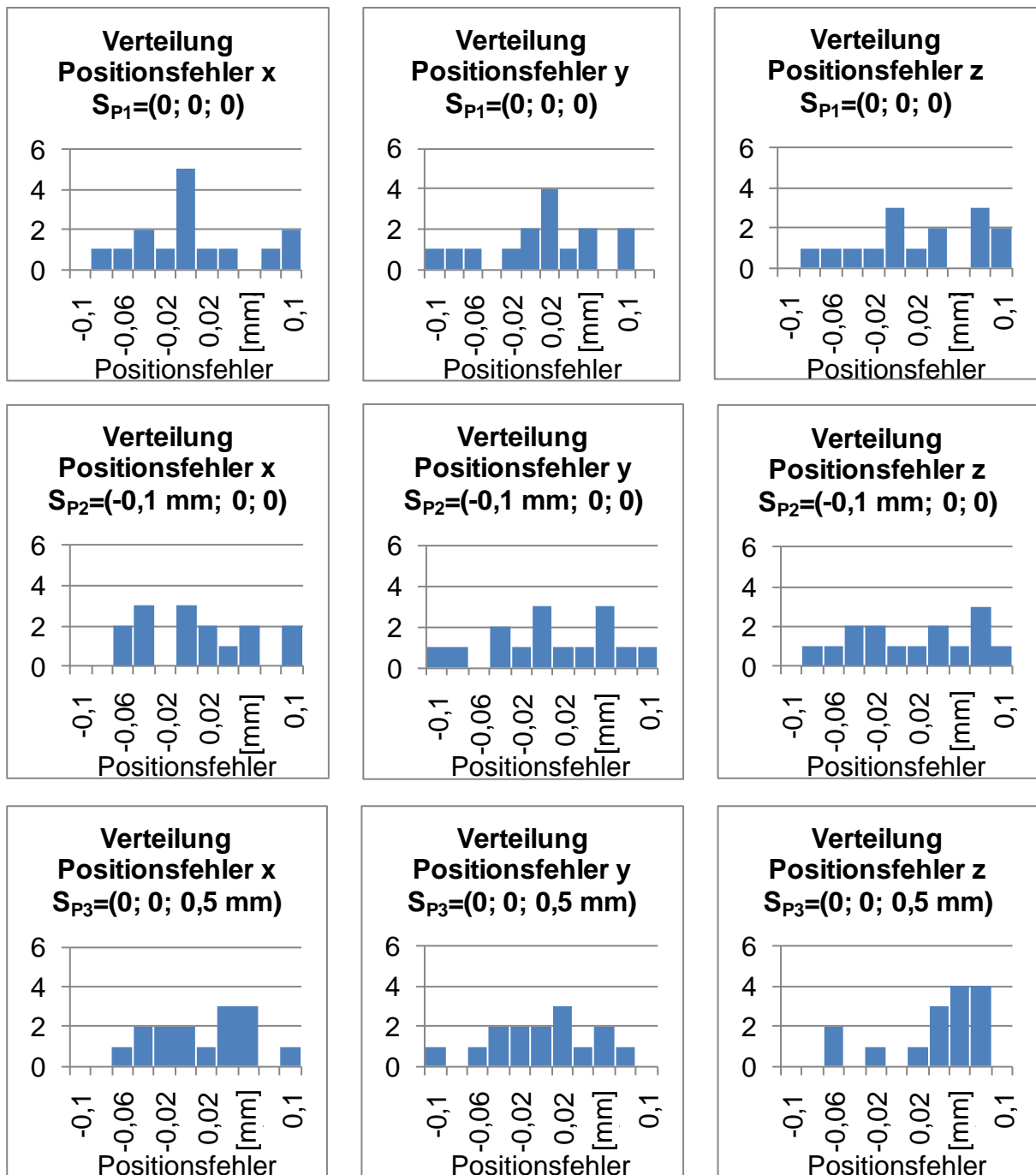


Bild 7-20: Verteilung der Relativfehler für drei unterschiedliche Positionen bei 15-facher Ausführung des Genetischen Algorithmus pro Position

Durch Mittelung der relativen Fehler, wird für die in Bild 7-20 dargestellten Spiegelpositionen eine mittlere translatorische Genauigkeit von $\Delta(xyz) = 5,37 \mu\text{m}$ erreicht. Nachteilig an der wiederholten Positionsberechnung ist der damit verbundene Zeitaufwand. Für fünfzehn Berechnungen pro Position wurden im Versuch pro Position ca. 2 Stunden Rechnerzeit benötigt.

Das Konvergenzverhalten des evolutionären Algorithmus erwies sich in allen Versuchen als stabil. Bild 7-21 zeigt den Verlauf der Fitness über die Generationenanzahl

von 15 Optimierungsvorgängen. Der Fitnesswert eines Optimierungsvorgangs sinkt nach mehreren Generationen und zeigt eine Konvergenz gegen Null. Eine vergleichbare Entwicklung im Verlauf der Generationen konnte bei allen 75 Versuchen beobachtet werden. Damit bestätigen die Positionierungsexperimente das Stabilitätsverhalten der theoretischen Untersuchungen aus Abschnitt 6.3.3.5.

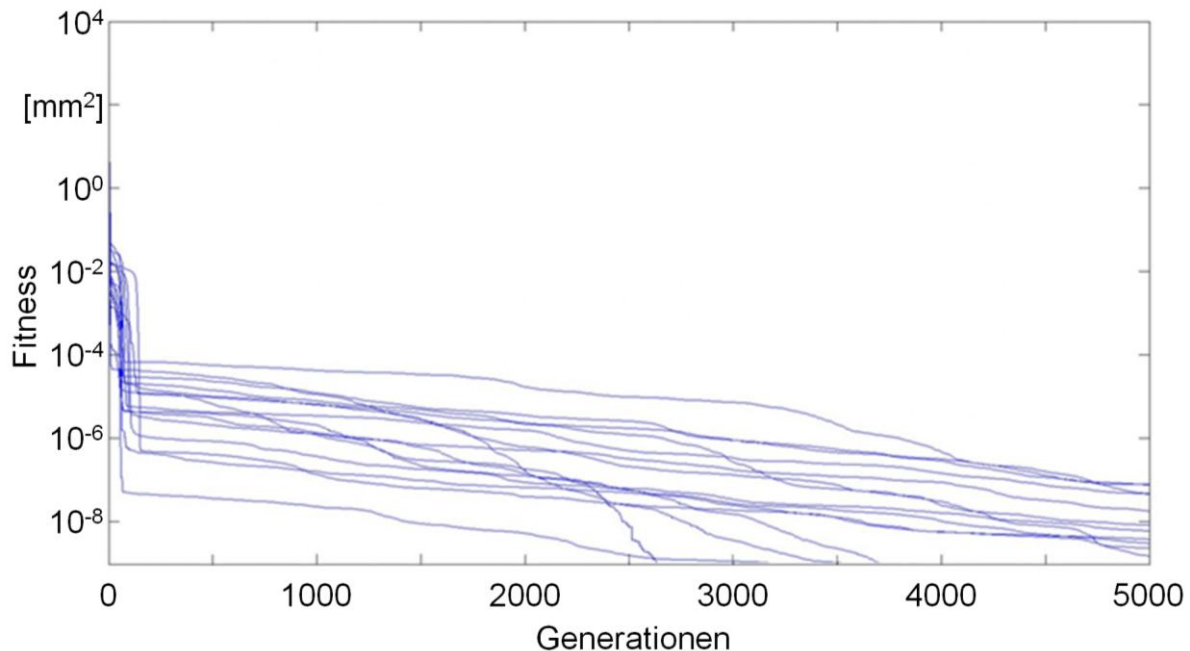


Bild 7-21: Fitnessentwicklung im Verlauf der Generationen im Versuch

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die guten Ergebnisse der theoretisch-mathematischen Untersuchung des evolutionären Algorithmus im Versuch nicht vollständig bestätigt werden konnten. Der Algorithmus zeigt ein stabiles Konvergenzverhalten und die Winkelgenauigkeit entspricht mit $\Delta\alpha \leq 0,012^\circ$ den Anforderungen der Montage optischer Mikrosystemkomponenten. Der translatorische Positionsfehler liegt mit $\Delta(xyz)_{DK} = 67,9 \mu\text{m}$ allerdings über dem geforderten Wert von $\Delta(xyz) \leq 10 \mu\text{m}$. In vereinzelt Versuchen ist es zwar gelungen durch den Mittelwert mehrere Positionierungsvorgänge eine Genauigkeit von $\Delta(xyz) = 5,37 \mu\text{m}$ zu erreichen, die dafür benötigte Zeit lag mit ca. 2 Stunden aber deutlich über dem für die Anwendung in der automatisierten Mikromontage tolerierbaren Grenzwerts.

8 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

8.1 Technische Integration

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Methode der Laserreflexiven Positionierung vorgestellt, Algorithmen zur Lösung des Positionierungsproblems entwickelt und die theoretischen Untersuchungen an einem Anwendungsbeispiel, der Montage eines Laserscanners, validiert. In Kapitel 8 wird nun gezeigt, wie die Systemtechnik zur Integration der Laserreflexiven Positionierung in eine automatisierte Mikromontageanlage aussehen kann und wie die LRP wirtschaftlich zu bewerten ist.

Die Anwendung der Laserreflexiven Positionierung in einem realen Produktionsszenario setzt voraus, dass eine Schnittstelle zwischen Produkt und Montagesystem nach den Richtlinien der mechatronischen Montage (MeMo) vorhanden ist (ANGERER 2004). Hardwaretechnisch kann die Schnittstelle über ein Greifsystem aufgebaut werden, das über elektrisch leitende mit der Anlagensteuerung verbundene Metallfinger verfügt, die beim Greifen der Spiegelbaugruppe die Kontaktflächen auf der Platinenrückseite berühren (Bild 8-1).

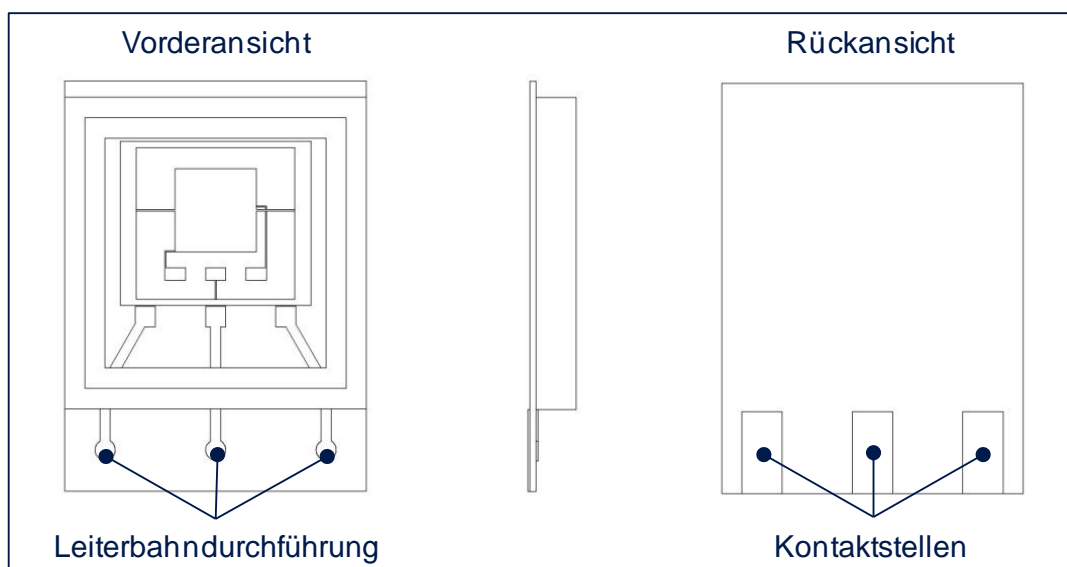


Bild 8-1: Vorder- und Rückansicht der Spiegelbaugruppe mit produktseitiger MeMo-Schnittstelle

Verfügt das Montagesystem über eine entsprechende Verstärkereinheit, kann die Aktorik des Spiegels über die reibschlüssige Kontaktierung angesteuert werden. Der mechanische und elektrische Kontakt lässt sich dabei durch elastische Finger oder eine konstante Kraft sicherstellen, die die Spiegelbaugruppe an die Kontakte heranzieht. Die Kontaktkraft kann beispielsweise durch einen elastischen Balgsauger erzeugt werden. Um die technische Umsetzbarkeit der MeMo-Schnittstelle für die LRP zu zeigen,

8 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

wurden in der vorliegenden Arbeit mehrere Varianten zum MeMo-unterstützten Greifen der Mikrospiegelbaugruppen entwickelt. Ein System wurde dann prototypisch umgesetzt (Bild 8-2) und in eine automatisierte Mikromontageanlage integriert (Bild 8-3).

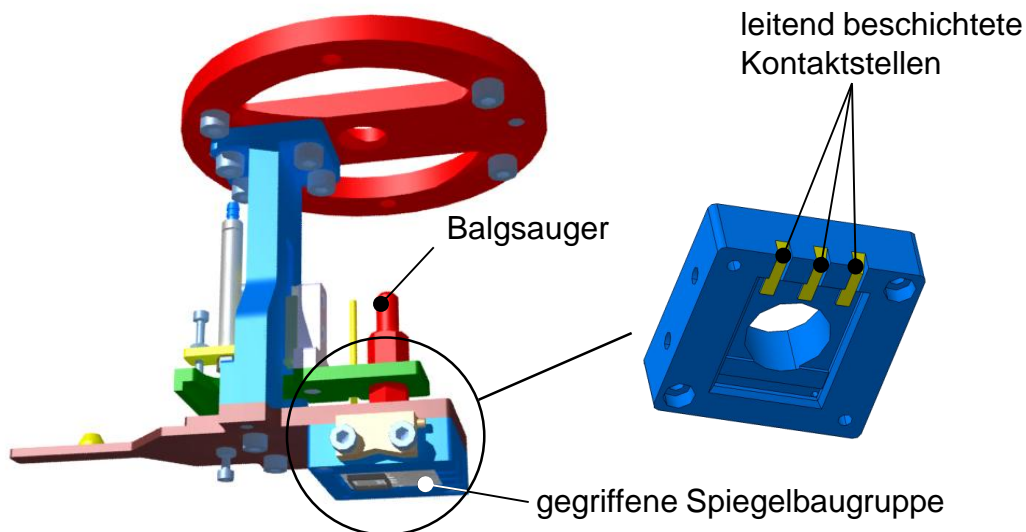


Bild 8-2: CAD-Modell des MeMo-Greifers und systemseitige MeMo-Schnittstelle

Bild 8-3 zeigt den Prototypen des MeMo-Greifers in der automatisierten Mikromontageanlage. Die zu montierenden Spiegelbaugruppen werden auf einem Gelkissen bereitgestellt und von oben gegriffen.

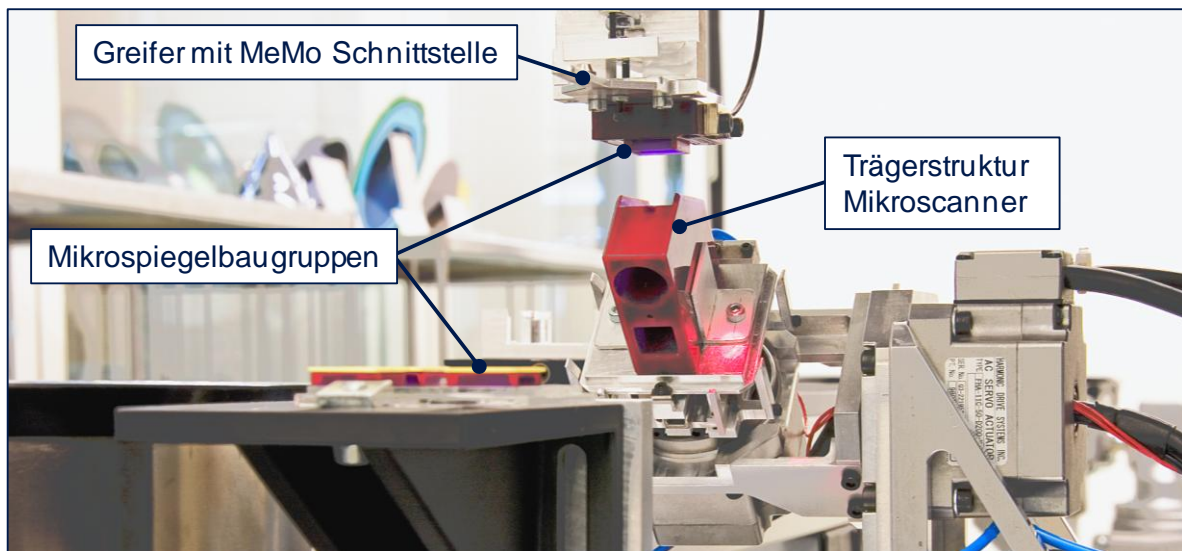


Bild 8-3: Integration der LRP in eine voll automatisierte Mikromontageanlage

Da die mechatronische Montage nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit steht, sei für weitere Details zur softwaretechnischen Implementierung und möglichen Tests von MeMo-Schnittstellen auf die Arbeiten von ANGERER (2004) verwiesen.

Nachdem mithilfe des beschriebenen MeMo-Greifers eine Verbindung zwischen Montagesystem und Spiegel hergestellt wurde, kann der gegriffene Mikrospiegel in den

Laserstrahl eingebracht und vorpositioniert werden. Die weitere Feinpositionierung kann dann durch die LRP und die in Kapitel 6 beschriebenen Methodik erfolgen.

8.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse

8.2.1 Betrachtungsraum

Die Methode der Laserreflexiven Positionierung von Mikrokippspiegeln lässt sich in die Praxis der Mikromontage übertragen. Dies konnte an der Spiegelpositionierung zur Montage eines Laserscanners gezeigt werden (vgl. Kapitel 7). Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse relevante Ergebnisse sind insbesondere die in den Positionierungsversuchen verwendete Systemtechnik (vgl. Abschnitt 7.2), die in den Versuchen erreichten Positionierzeiten und -genauigkeiten (vgl. Abschnitt 7.3) sowie die Systeme zur Integration einer MeMo-Schnittstelle in eine Mikromontageanlage (vgl. Abschnitt 8.1).

Der analytisch-numerische Algorithmus zur Berechnung der Bauteillage lieferte stabile Positionsergebnisse mit einer Genauigkeit von unter $10\ \mu\text{m}$ in einer Zeit von ca. 17,8 Sekunden pro Bauteil. Damit erfüllt er die wesentlichen Anforderungen der automatisierten Montage optischer Mikrokomponenten und kann in die industrielle Praxis übertragen werden. Der evolutionäre Algorithmus wies dagegen Schwächen in den Bereichen Genauigkeit, Konvergenz und Berechnungszeit auf. Diese drei Faktoren sprechen gegen einen Einsatz des Algorithmus in produktiven Montagesystemen. Eine Berechnungszeit zwischen 15 Minuten und 2 Stunden pro Bauteil ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten indiskutabel. Im Folgenden wird deshalb nur die Wirtschaftlichkeit der Laserreflexiven Positionierung von Mikrospiegeln auf Basis des analytisch-numerischen Algorithmus betrachtet.

Um die Wirtschaftlichkeit eines LRP-gestützten Montagesystems bewerten zu können, wird dieses am Beispiel des in den Abschnitten 7.1 und 8.1 beschriebene Anwendungsfalls zwei herkömmlichen Mikromontagesystemen gegenübergestellt. Betrachtet werden Maschinenstundensatz, Taktzeit und Zielstückzahl.

8.2.2 Kostenrechnung

Aufgrund der Herausforderungen, die bei der Montage Mikrospiegel- und MOEMS-basierter Produkte auftreten (vgl. Abschnitt 3.2), sind nur wenige existierende Montagesysteme technisch in der Lage, diese Produkte zu montieren. Das Standardsystem zur Montage von Produkten, die Mikrokippspiegel beinhalten, ist ein hochgenau absolut positionierender Pick-and-Place-Roboter (Genauigkeit absolut $\leq 1\ \mu\text{m}$), der über

8 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

ein optisches System zur Vermessung der Baugruppentoleranzen verfügt. Der Roboter folgt damit dem Montageprinzip der „Absolutpositionierung mit vorgelagerter Messung“ (APM). Diesem System werden zwei relativ positionierende Systeme gegenübergestellt; zum einen ein System mit zusätzlicher Bauteilrückseitenvermessung (RPR) und zum anderen eines mit integrierter Laserreflexiver Positionierung (LRP). Die Beschaffungskosten der Komponenten der verschiedenen Systeme basieren auf aktuellen Produktpreisen der Firmen Physik Instrumente, Harmonic Drive, National Instruments, Schunk, Rohwedder, Sysmelec, Festo, Bosch Rexroth, Sios Messtechnik, STM Sensortechnologie München, Hamamatsu, Dymax und INA Drives and Mechatronics. Die Integrationskosten für die Standardkomponenten wurden durch den Vergleich der herstellerseitig zur Verfügung gestellten Schnittstellen geschätzt. Den Integrationskosten für die RPR-Sensorsysteme wurden die Beträge von JACOB (2002) zugrunde gelegt. Die Kosten für die Integration der LRP wurden auf Basis der Arbeitsstunden ermittelt, die im Versuch für die Umsetzung der LRP aufgewandt wurden. Im Folgenden werden alle Systeme kurz vorgestellt und deren jeweiligen Beschaffungskosten tabellarisch erfasst.

Das APM-System bestimmt die Toleranzen zwischen Referenzmarken und dem Spiegelmittelpunkt durch eine Vollprüfung (100%-Prüfung) der Mikrospiegelbaugruppen in einem der Positionierung vorgelagerten Schritt. Mit diesen Daten lässt sich ein bauteilspezifischer Korrekturwert für die Absolutpositionierung berechnen, der die Baugruppentoleranzen ausgleicht. Die Bauteilpositionierung selbst wird dann durch einen kartesischen, hochgenau absolut positionierenden Roboter durchgeführt. Tabelle 8-4 gibt einen Überblick über das System der APM und fasst die Beschaffungskosten nach Komponenten gegliedert zusammen.

Absolutpositionierung mit vorgelagerter Messung (APM)	
Kamerasystem mit Messoptik zur Baugruppenvermessung in x- und y-Richtung	10.000,00 €
Beleuchtungssystem	3.000,00 €
Lasertriangulator zur Vermessung der Baugruppentoleranzen in z-Richtung	15.000,00 €
Bildverarbeitungssystem	5.000,00 €
Absolutkinematik (Absolutgenauigkeit $\approx 1 \mu\text{m}$) inkl. Granitgestell	140.000,00 €
Standard-Endeffektor	200,00 €
Spannsystem mit Zusatzkinematik	7.000,00 €
UV-Lampe zur Klebstoffaktivierung	1.500,00 €
Rakelstation	3.000,00 €
Zuführkomponenten	10.000,00 €
Integrationskosten	15.000,00 €
Summe (Beschaffungswert)	209.700,00 €

Tabelle 8-1: Systemkonfiguration und Investitionen für das Montageszenario APM

Eine zweite Möglichkeit, die Montage des Mikrosanners mit der zurzeit verfügbaren Technologie zu automatisieren, ist der Einsatz einer Relativkinematik (Genauigkeit relativ $\leq 1 \mu\text{m}$) in Kombination mit einer Bildverarbeitung zur Positionserkennung der Bauteilrückseite. Vor der eigentlichen Positionierung wird bei der RPR mit einer speziellen Optik die Bauteiloberseite zur Unterseite bzw. Rückseite referenziert. Außerdem werden mittels eines Laserscanners die Topographietoleranzen der Baugruppe erfasst und ebenfalls auf die Bauteilrückseite referenziert. Durch diese Referenzierung kann die Bauteilrückseite zur Positionsbestimmung genutzt werden. Tabelle 8-2 zeigt die Beschaffungskosten und Komponenten der Variante „Relativpositionierung mit Rückseitenreferenzierung“ (RPR).

8 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

Relativpositionierung mit Rückseitenreferenzierung (RPR)	
Kamerasystem zur Bauteilvermessung mit Messoptik (Bauteilaufnahme von oben und unten gleichzeitig)	30.000,00 €
Beleuchtungssystem	6.000,00 €
Lasertriangulator zur Vermessung der Baugruppentoleranzen in z-Richtung	15.000,00 €
Bildverarbeitungssystem	5.000,00 €
Scankinematik	10.000,00 €
Relativkinematik (Relativgenauigkeit $\approx 1 \mu\text{m}$)	25.000,00 €
Standard-Endeffektor	200,00 €
Spannsystem mit Zusatzkinematik	7.000,00 €
UV-Lampe zur Klebstoffaktivierung	1.500,00 €
Rakelstation	3.000,00 €
Zuführkomponenten	10.000,00 €
Integrationskosten	30.000,00 €
Summe (Beschaffungswert)	142.700,00 €

Tabelle 8-2: Systemkonfiguration und Investitionen für das Montageszenario RPR

Die letzte Möglichkeit, den Mikros scanner automatisiert zu montieren, ist der Einsatz der LRP. Dafür wird ein hochgenau relativ positionierender Roboter (Genauigkeit relativ $\leq 1 \mu\text{m}$) um die Komponenten der LRP-Sensorik und um einen Greifer mit integrierter MeMo-Schnittstelle erweitert. Tabelle 8-3 fasst die benötigten Komponenten für das System „Laserreflexive Positionierung“ (LRP) zusammen.

Laserreflexive Positionierung (LRP)	
Laserquelle	4.500,00 €
PSD	1.050,00 €
Signalverstärker	1.390,00 €
Steuerelektronik Spiegel	500,00 €
Relativkinematik	25.000,00 €
MeMo-Endeffektor	1.000,00 €
Spannsystem mit Zusatzkinematik	7.000,00 €
DAQ Schnittstelle für Sensortechnik	1.000,00 €
Kalibrierungselemente	4.000,00 €
UV-Lampe zur Klebstoffaktivierung	1.500,00 €
Rakelstation	3.000,00 €
Zuführkomponenten	10.000,00 €
Integrationskosten	30.000,00 €
Summe (Beschaffungswert)	89.940,00 €

Tabelle 8-3: Systemkonfiguration und Investitionen für das Montageszenario LRP

Nach VDI-RICHTLINIE 3258A UND B (VDI/VDE 1964) berechnet sich der Maschinenstundensatz K_{MH} aus den Abschreibungskosten K_A , den kalkulatorischen Zinskosten K_Z , den Raumkosten K_R , den Energiekosten K_E und den Instandhaltungskosten K_I .

$$K_{MH} = K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I \quad (8.1)$$

Die Abschreibungskosten setzen sich dabei aus dem Beschaffungswert der Systeme BW , der Nutzungsdauer N_D , der jährlichen Arbeitszeit E_Z und der Verfügbarkeit V der Systeme zusammen:

8 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

$$K_A = \frac{BW}{N_D * E_Z * V} \quad (8.2)$$

Für die hier durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse wird für alle Systeme eine Nutzungs- bzw. Abschreibungsdauer von 5 Jahren bei einer jährlichen Arbeitszeit im Zweischichtbetrieb von 2.400 Stunden angenommen.

Die kalkulatorischen Zinskosten können über den Beschaffungswert und den Zinssatz Z ermittelt werden. Über die gesamte Abschreibungsdauer wird für alle Montageszenarien ein Zinssatz von 10 % pro Jahr angesetzt.

$$K_Z = \frac{BW * Z}{2 * E_Z * V} \quad (8.3)$$

Zur Abschätzung der Raumkosten für die Geräte, die im Reinraum betrieben werden müssen, werden die jährlichen Betriebskosten des Reinraums B_K von 550 €/m² herangezogen (HÖHN 2001). Zusammen mit dem Montageflächenbedarf A_M ergibt sich für die Raumkosten damit

$$K_R = \frac{A_M * B_K}{E_Z} \quad (8.4)$$

Für die Energiekosten wird ein Strompreis K_{ST} von 15 ct/kWh angenommen und für alle Systeme mit einem Standardnutzungsfaktor N_F und deren Nennleistung P_N verrechnet.

$$K_E = K_{ST} * N_F * P_N \quad (8.5)$$

Die Instandhaltungskosten lassen sich mit einem Instandhaltungskostensatz I_{KS} von jährlich 7 % des Beschaffungswerts wie folgt bestimmen

$$K_I = \frac{BW * I_{KS}}{N_D * E_Z * V} \quad (8.6)$$

Aus dem Maschinenstundensatz K_{MH} und den anteiligen Bedienerkosten K_B , die für alle Anlagen mit 15 €/h angesetzt werden, kann der Arbeitsstundensatz für die Montageanlagen berechnet werden.

$$K_{AH} = K_{MH} + K_B \quad (8.7)$$

In Tabelle 8-4 sind die auf den Gleichungen (8.1) bis (8.7) basierenden Wirtschaftsdaten für die Montagevarianten APM, RPR und LRP gegenübergestellt. Die Werte für die Systemverfügbarkeiten stammen aus Herstellerangaben und aus Erfahrungswerten, die durch Expertenbefragung ermittelt wurden. Bei der LRP ging darüber hinaus die bei den Versuchen erreichte Verfügbarkeit ein.

8.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Parameter	Einheit	APM	RPR	LRP
Beschaffungswert	€	209.700,00	142.700,00	89.940,00
Nutzungsdauer	a	5	5	5
Arbeitszeit im Jahr	h/a	2400	2400	2400
Verfügbarkeit		90%	90%	80%
Abschreibungskosten	€/h	19,42	14,86	10,71
Zinssatz	1/a	10%	10%	10%
Kalkulierte Zinskosten	€/h	4,85	3,72	2,68
Flächenbedarf	m ²	11,1	5,25	5,25
Betriebskosten	€/m ² a	550,00	550,00	550,00
Raumnutzungskosten	€/h	2,54	1,20	1,20
Nennleistung	kW	5,0	4,0	3,5
Strompreis	€/kWh	0,15	0,15	0,15
Nutzungsfaktor		60%	60%	60%
Energiekosten	€/h	0,45	0,36	0,315
Instandhaltungskostensatz		7%	7%	7%
Instandhaltungskosten	€/h	1,36	1,04	0,75
Maschinenstundensatz	€/h	28,6	21,2	15,65
Anteilige Bedienerkosten	€/h	10,0	10,0	10,0
Arbeitsstundensatz	€/h	38,62	31,18	25,65
Taktzeit pro Fügeoperation	s	5	40	60

Tabelle 8-4: Gegenüberstellung der monetären Kennzahlen der Montageszenarios APM, RPR und LRP

Betrachtet man die in der Produktion eines Unternehmens geplante Ausbringleistung im Zusammenhang mit den von den Anlagen erzielbaren Taktzeiten und den Arbeitsstundensätzen, lassen sich für jedes Montagesystem die effektiven Montagekosten pro Stück berechnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Montage eines Mikroscanners zwei Fügeoperationen notwendig sind.

Der Vorteil der LRP und der RPR gegenüber der APM ist der Einsatz von günstigen Relativkinematiken. Auf der anderen Seite können durch absolut positionierende Systeme erheblich niedrigere Taktzeiten erreicht werden. Bild 8-4 zeigt die Montage-

8 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

stückkosten in Abhängigkeit von der geplanten jährlichen Ausbringleistung bei einem Zweischichtbetrieb (2.400 Arbeitsstunden pro Jahr) für alle Montageszenarien.

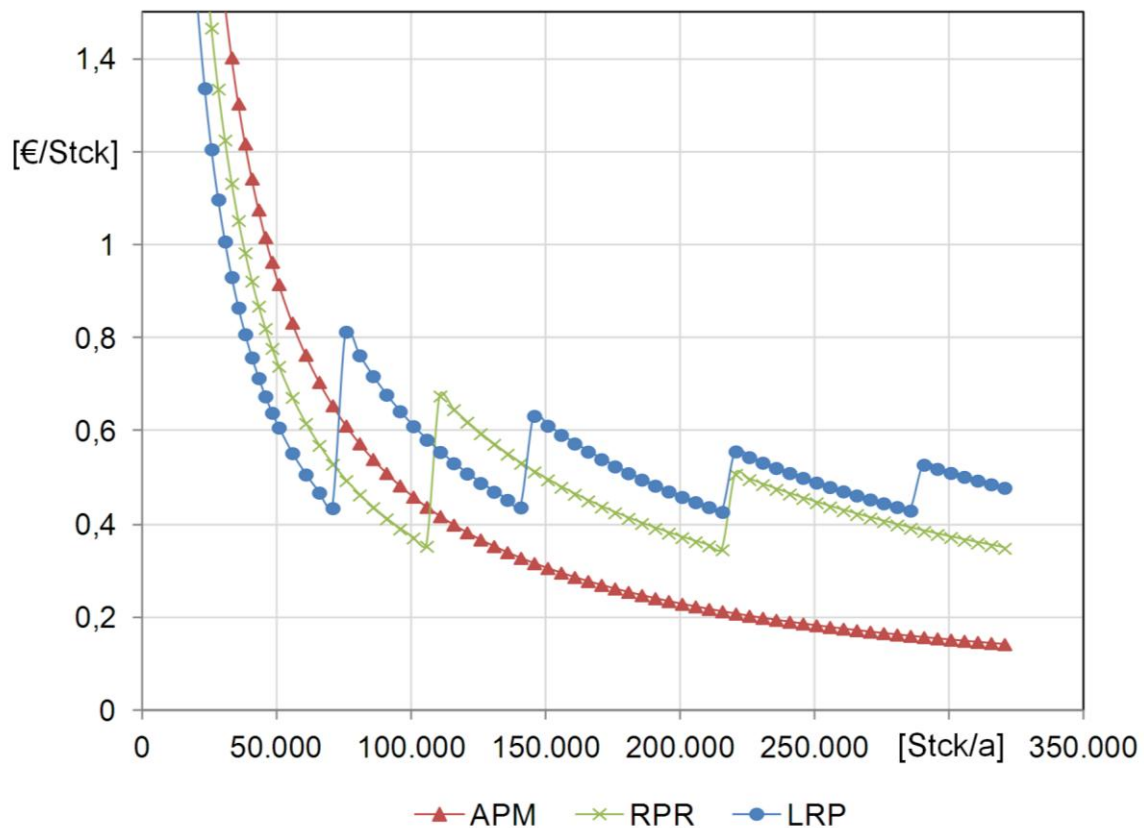


Bild 8-4: Stückkosten in Abhängigkeit von der Jahresausbringleistung für unterschiedliche Montageszenarien

Zu erkennen ist, dass die LRP für kleine Stückzahlen im Bereich von einer Zielausbringleistung kleiner als 70.500 Stück pro Jahr die wirtschaftlichste Alternative darstellt. Im mittleren Stückzahlbereich, d.h. bei einer Zielausbringleistung zwischen 70.500 und 110.500 Stück pro Jahr, ist die RPR den anderen Montageszenarien vorzuziehen. Dies liegt vor allem an der kürzeren Taktzeit der RPR. Ab einer Ausbringleistung von 110.500 Stück pro Jahr empfiehlt sich der Einsatz absolut positionierender Systeme (APM).

9 Zusammenfassung und Ausblick

In modernen optischen Mikrosystemen und MOEMS-basierten Produkten sind viele sehr unterschiedliche Funktionen auf engem Raum konzentriert. Viele MOEMS-basierte Produkte lassen sich deshalb nicht monolithisch fertigen, sie müssen vielmehr hybrid aus verschiedenen mikrooptischen Elementen wie Mikroschwingspiegeln, Linsen, Dioden oder Mikrolasern zusammengesetzt werden. Die Montage MOEMS-basierter Produkte erfordert eine außerordentlich schonende Bauteilhandhabung und eine sehr hohe Positioniergenauigkeit. Letztere beeinflusst maßgeblich die Funktion und die Qualität der montierten Systeme. In der industriellen Praxis werden hybride MOEMS entweder manuell mit geeigneten Handhabungshilfen montiert oder durch automatisierte, robotergestützte Mikromontagesysteme zusammengebaut. In beiden Fällen wird bei der Positionierung von Mikrokipps- und Mikroschwingspiegeln aufgrund sensortechnischer Einschränkungen nicht die gewünschte Genauigkeit erreicht. Da diese Spiegel zunehmend in optische Mikrosysteme integriert werden sollen, herrscht großer Bedarf an Sensorsystemen, die für die Positionierung beweglicher Mikrospiegel geeignet sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit war deshalb die Entwicklung einer Methode zur berührungslosen, lasergestützten, hochgenauen Positionierung von Mikrokippspiegeln. Darüber hinaus sollte ein Sensorsystem entworfen werden, das die Methode für die Mikromontage nutzt und ihre praktische Anwendbarkeit zeigt.

Die Analyse der Montage von Spiegel-basierten MOEMS ergab als Ursache für die unzureichende Genauigkeit existierender Sensorsysteme drei zentrale Herausforderungen bei der Bauteilpositionierung. Optische Mikrokomponenten müssen erstens *in sechs räumlichen Freiheitsgraden positioniert werden*, sie sind zweitens *sowohl optisch als auch taktil schwer zugänglich* und sie erfordern drittens *eine Ausrichtung an fugefernen Referenzelementen*.

Aus den Ergebnissen der Analyse wurden die Anforderungen an das neue Sensorsystem zur Positionierung von MOEMS abgeleitet und darauf aufbauend eine Methode zur Lagebestimmung von Mikrokippspiegeln entwickelt. Zur Positionierung eines Mikrokippspiegels wird dabei der Strahl eines Messlasers am Spiegel reflektiert. Gleichzeitig wird die Aktorik des Spiegels ausgelenkt und die zurückgelegte Bahn des reflektierten Strahls mit einem optischen 2D-Sensor erfasst.

Eine zu Beginn der Arbeit durchgeführte Simulation der relevanten Größen Laser, Spiegel und Sensor zeigte mithilfe der geometrischen Optik, dass das auf dem Sensor bei der Bewegung des Spiegels entstehende Lasermuster charakteristisch für die Position des Spiegels ist. Auf Basis dieses Ergebnisses wurden zwei unterschiedliche ma-

thematische Methoden zur Berechnung der Lage des Spiegels entwickelt: diese sind ein *analytisch-numerischer Algorithmus* und ein *evolutionäres Vorgehen*.

Für den Entwurf des *analytisch-numerischen Algorithmus* wurde zuerst ein analytisches Übertragungsmodell aufgestellt. Dieses Modell basiert, ähnlich wie die Simulation zur Mustercharakterisierung, auf der geometrischen Optik. Allerdings wurde zur Vereinfachung der im Modell entstehenden Gleichungssysteme eine spezielle Initialraumkonfiguration entwickelt, in der relevante Vektorgrößen normiert und durch Kugelkoordinaten dargestellt werden. Aus dem analytischen Übertragungsmodell wurde dann ein Gleichungssystem zur Beschreibung der sechs räumlichen Freiheitsgrade des Spiegels abgeleitet. Die Nullstellenlösung dieses Gleichungssystems stellt die gesuchte Spiegelposition dar. Mit der Methode „Trust-Region-Dogleg“ konnte ein Verfahren identifiziert werden, welches sich zur Lösung des Gleichungssystems eignet. Eine Monte-Carlo-Simulation zeigte eine theoretische Genauigkeit des analytisch-numerischen Algorithmus mit einem gemittelten maximalen Fehler von translatorisch $1,6 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$ und rotatorisch zwischen 0 und $3,0 \cdot 10^{-10} \text{ }^\circ$.

Parallel zum analytisch-numerischen Algorithmus wurde ein Verfahren zur Bestimmung der Spiegelposition auf Basis eines *evolutionären Vorgehens* entwickelt. Bei diesem Vorgehen wird das genetische Optimierungsverfahren der Evolutionsstrategie angewendet. Zunächst wurde zur Bewertung möglicher Lösungen eine Fitnessfunktion aufgestellt, die die Lösungsgüte durch den Vergleich des IST-Reflexionsmusters mit dem theoretischen Optimalmuster bestimmt. Darauf aufbauend wurde eine Beschreibung der Spiegelpositionen als Individuen einer Generation aus möglichen Lösungen erarbeitet. Die Lösungen werden dabei in Form eines Vektors dargestellt, der neben den Positionsinformationen auch Informationen zu Mutationsschrittweiten und Fitnesswert enthält. Danach wurden durch eine Operatoranalyse die Strategieparameter, die Mutationsschrittweiten, das Selektionsschema und die Größe der Nachkommenpopulation anhand des Generationenverlaufs der Evolutionsstrategie optimiert. Zum Nachweis der theoretischen Positioniergenauigkeit des Verfahrens wurde, analog zum analytisch-numerischen Algorithmus, eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Die ermittelte theoretische Genauigkeit der translatorischen Freiheitsgrade lag bei $4,98 \mu\text{m}$, die Winkelabweichung zwischen $1,3 \cdot 10^{-8} \text{ }^\circ$ und $-6,1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ$.

Zur Validierung der simulativ erreichten Genauigkeiten beider Lösungsmethoden wurde ein Versuch durchgeführt, der die Positionierung einachsiger Mikrospiegel bei der Montage eines Mikrosanners abbildete. Dabei musste eine vormontierte Baugruppe, die einen einachsigen schwenkbaren Mikrospiegel beherbergt, mit einer Genauigkeit von translatorisch unter $10 \mu\text{m}$ und rotatorisch weniger als $0,1 \text{ }^\circ$ positioniert werden. Bedingt durch die Bauteiltoleranzen, die Gehäusestruktur und die Spiegelpositionierung relativ zum Strahlengang des Lasers, brachte dieses Montageszenario alle

oben genannten Herausforderungen bei der Bauteilpositionierung mit sich. Zur Bestimmung der Bauteillage wurde die Aktorik des Mikrospiegels – gemäß der mechatronischen Montage (ANGERER 2004) – über eine Schnittstelle im Greifer des Montagesystems angesteuert und ausgelenkt. Auf den bewegten Spiegel wurde dann ein He-Ne-Laser fokussiert, dessen Reflexion mit einem zweidimensionalen PSD-Sensor erfasst wurde. Der Versuch zeigte, dass der *analytisch-numerische Algorithmus auch unter realen Bedingungen sehr gute Ergebnisse erzielt*. Die erreichten Genauigkeiten lagen bei $8,6\ \mu\text{m}$ translatorisch und $1,9 \cdot 10^{-3}\ ^\circ$ rotatorisch. Das evolutionäre Vorgehen allerdings wies eine hohe Sensitivität gegenüber Kalibrierungsfehlern sowie Toleranzen im Versuchsstand und damit ein instabiles Verhalten unter Realbedingungen auf. Die Konvergenz des evolutionären Algorithmus war, anders als in der Simulation, nicht immer gewährleistet. Deshalb wurde neben der Zielfitness eine maximale Generationenanzahl als weiteres Abbruchkriterium eingeführt. Die so im Versuch erreichten Genauigkeiten des evolutionären Algorithmus lagen bei $46\ \mu\text{m}$ translatorisch und $4,13 \cdot 10^{-3}\ ^\circ$ rotatorisch. Die Anforderungen des Montageszenarios wurden damit nur teilweise erfüllt.

Die Arbeit schließt mit der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Laserreflexiven Positionierung. Wegen der im Versuch erreichten schlechten Werte für die Genauigkeit des evolutionären Vorgehens, wurde hier nur der analytisch-numerische Algorithmus berücksichtigt. Für Letzteren konnte anhand der Versuchsergebnisse eine Taktzeit von 60 Sekunden unter Realbedingungen abgeschätzt werden. Der Vergleich dieses Werts zusammen mit den Investitionskosten sowie dem Maschinenstundensatz mit den entsprechenden Werten eines absolut positionierenden Montagesystems und eines relativ positionierenden Montagesystems mit Rückseitenreferenzierung ergab einen wirtschaftlichen Einsatzbereich der LRP-gestützten automatisierten Mikromontage unterhalb einer Zielausbringleistung von ca. 70.000 Stück pro Jahr.

Auf der Grundlage der mathematischen Herleitungen der Gleichungen zur Positionsberechnung, der Simulationen und der Versuche konnte in der vorliegenden Dissertation nachgewiesen werden, dass die Laserreflexive Positionierung eine geeignete Methode ist, *dreh- und kippbare Mikrospiegel bei eingeschränkter optischer und taktile Zugänglichkeit in sechs räumlichen Freiheitsgraden berührungslos und hochgenau zu positionieren*. Alle Anforderungen aus der Montage optischer Mikrokomponenten werden durch das Sensorprinzip erfüllt.

Neben der Mikromontage ist der Einsatz der LRP auch in anderen Bereichen der Automatisierungstechnik denkbar. Die in den Simulationen erreichten Berechnungsgenauigkeiten zeigten, dass eine Integration der Sensorkomponenten und des Schwingspiegels in eine hochgenau kalibrierte Gesamtanordnung die Genauigkeit des Verfahrens deutlich erhöht. In systemtechnische Komponenten integrierte Mikro-

9 Zusammenfassung und Ausblick

schwingspiegel könnten dann beispielsweise zur hochgenauen Positionsbestimmung und Ausrichtung von Masken oder Nanoimprint-Stempeln in der Halbleiterfertigung eingesetzt werden.

Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1: Beispiele für Innovationen durch die Mikrosystemtechnik: (a) Endoskop (zur Verfügung gestellt von Pentax GmbH, Hamburg 2009); (b) Schalter für die optische Datenübertragung basierend auf einem beweglichen Mikrospiegel (BISHOP ET AL. 2001)	1
Bild 2-1: Die Mikrosystemtechnik in Anlehnung an FISCHER (1997)	6
Bild 2-2: Drehratensensor monolithischer Bauweise (GERLACH ET AL. 2006): (a) dreidimensionales Modell; (b) Mikroskopaufnahme mehrerer Sensoren im Waferverbund	7
Bild 2-3: Mikrolaser (zur Verfügung gestellt vom Fraunhofer IOF)	8
Bild 2-4: Unterschiedlicher Montagetypen in Anlehnung an PETERSEN (2003).....	9
Bild 2-5: Funktionseinheiten eines automatisierten Mikromontagesystems	11
Bild 2-6: Serielle und parallele Kinematiken für die Mikro- und Präzisionsmontage .	15
Bild 2-7: Funktionsweise eines Piezo-Nibbel-Antriebs am Beispiel des Nanomotion Drive (JOHNSON ELECTRIC - NANOMOTION 2009)	17
Bild 2-8: Beispiele für kommerziell erhältliche Präzisionsroboter: (a) Sysmelec Autoplace 411 (SYSMELEC 2009); (b) Funktionsmuster Parvus (STUMPP ET AL. 2006)	18
Bild 2-9: Beispiele für Multipod-Präzisionsroboter: (a) Triglide-Roboter (BUDDE ET AL. 2007); (b) PI M-824 (PHYSIK INSTRUMENTE (PI) 2008)	19
Bild 2-10: Greifprinzipien in der Mikromontage (in Anlehnung an HESSE 1991, HESSELBACH ET AL. 2007, TICHEM ET AL. 2004 und SCHILP 2007)	21
Bild 2-11: Beispiele für Mikrogreifer: (a) Mechanischer Greifer mit Aktoren aus Formgedächtnislegierungen (HOXHOLD ET AL. 2008); (b) Berührungsloser Ultraschallgreifer (REINHART ET AL. 2008B).....	23
Bild 2-12: Koordinatensysteme bei Absolutpositionierung	26
Bild 2-13: Komponenten eines bildverarbeitenden Sensorsystems in Anlehnung an SCHÖTTLER (2008) und DRIESSEN ET AL. (2004).....	28
Bild 2-14: Schematischer Aufbau von Lasertriangulatoren und Interferometern in Anlehnung an GEVATTER ET AL. (2006) und ENCYCLOPEDIA BRITANNICA (2010).....	29

Abbildungsverzeichnis

Bild 2-15: Beispiele für passive Eigenausrichtung: (a) Ausrichtung über hydrophobe Konditionierung der Fügeflächen (TERFORT ET AL. 1997); (b) Ausrichtung durch die Oberflächenspannung von Lottropfen (HARSH ET AL. 1999)	33
Bild 2-16: Durch Klapptechniken montierter Mikrospiegel (MULLER ET AL. 1998) ...	35
Bild 2-17: Stereophotogrammetrisches Objektiv (BÜTTGENBACH ET AL. 2006): (a) Funktionsmodell; (b) Einsatz in der Mikromontage.....	37
Bild 2-18: Lagebestimmung unterstützt durch CAD-Daten: (a) Bestimmung von Kameraperspektive und Lage eines Mikrozahnrads durch Einpassen in die zugehörige CAD-Drahtgitter-Struktur (KRATOCHVIL ET AL. 2004); (b) Dreidimensionale Illustration der Ist-Lage und der Soll-Lage (TAMADAZTE ET AL. 2009).....	40
Bild 2-19: Vorgehen bei der Positionierung mithilfe der Überlagerung diametraler Aufnahmen (HÖHN 2001)	41
Bild 2-20: Dreistrahlinterferometer: (a) Kommerziell erhältlicher Messkopf (SIOS MESSTECHNIK GMBH 2010); (b) Funktionsskizze (PÖSCHEL ET AL. 2006)	42
Bild 2-21: Funktionsskizze der Laser-Marker-Erkennung in Anlehnung an PARK ET AL. (1999).....	43
Bild 3-1: CAD-Modell eines Mikroprojektors (Fraunhofer IZM)	46
Bild 3-2: Modell eines Scanners für Laservibrometer im Halbschnitt	47
Bild 4-1: Querschnitt und Intensitätsverteilung eines TEM ₀₀ -Lasers mit Kreisquerschnitt im Bereich der Strahltaile in Anlehnung an HÜGEL & GRAF (2009)	57
Bild 4-2: Strahlformung eines Lasers bei Fokussierung mittels einer Linse in Anlehnung an DONGES (2007).....	58
Bild 4-3: Aufbau und Ladungstransfer eines CCD-Sensors.....	60
Bild 4-4: Funktionsprinzip eines duolateralen PSD	61
Bild 4-5: Aufbau einer Vier-Quadranten-Photodiode (ENGEL 2002).....	63
Bild 5-1: Struktur eines einfachen evolutionären Algorithmus (POHLHEIM 2000)	69
Bild 5-2: Aufbau eines Strings (NISSEN 2000)	70
Bild 5-3: Ein-Punkt-Crossover Genetischer Algorithmen (WEICKER 2007).....	70
Bild 5-4: Crossover zwischen zwei Programmen [in Anlehnung an Nissen (2000)]... ..	72
Bild 6-1: Zusammenschluss von Produkt und Montagesystem (ANGERER 2004)	79
Bild 6-2: Relevante Komponenten bei der mechatronischen Montage mikrooptischer Spiegelsysteme.....	80

Bild 6-3: Prinzipskizze der Laserreflexiven Positionierung	81
Bild 6-4: Strahlreflexion an einer planen, vollständig reflektierenden Oberfläche.....	84
Bild 6-5: Drehungen des körperfesten Koordinatensystems bei Rotation um eine beliebige durch dR gegebene Achse.....	86
Bild 6-6: Dreidimensionale Visualisierung des Strahlengangs bei der Laserreflexiven Positionierung	87
Bild 6-7: Variation der Spiegelstellung in x- (li.) und z-Achse (re.) (vgl. Tabelle 6-3)	90
Bild 6-8: Lotfehler bzw. drehachsenkompensierter Positionsfehler.....	90
Bild 6-9: Initialraumkonfiguration.....	96
Bild 6-10: Vorgehen zur analytischen Beschreibung von <i>PLD</i>	97
Bild 6-11: Flussdiagramm zur Stabilitäts- und Genauigkeitsanalyse	102
Bild 6-12: Abweichung der Spiegelpositionsparameter bei der Sensitivitätsanalyse	104
Bild 6-13: Fehlerverteilungen des analytisch-numerischen Algorithmus	106
Bild 6-14: Analysebasierter Ansatz zum Entwurf evolutionärer Algorithmen in Anlehnung an WEICKER (2007)	109
Bild 6-15: Anforderungsanalyse nach dem analysebasierten Ansatz (WEICKER 2007)	110
Bild 6-16: Fitnessbewertung durch quadratische Abstände der Musterstützpunkte ..	111
Bild 6-17: Problemanalyse und Risikobewertung nach dem analysebasierten Ansatz in Anlehnung an WEICKER (2007)	112
Bild 6-18: Flussdiagramm des evolutionären Algorithmus.....	117
Bild 6-19: Erstellung der Elternpopulation.....	118
Bild 6-20: Einfluss der Mutation auf das Sensorbild.....	119
Bild 6-21: Erzeugen einer Nachkommenpopulation	120
Bild 6-22: Verlauf der besten Fitness einer Generation über den Generationenindex	122
Bild 6-23: Fitnesswert über Generationen für $(\mu+\lambda)$ - und (μ, λ) -Selektion.....	124
Bild 6-24: Rechenzeit in Abhängigkeit von der Populationsgröße	125
Bild 6-25: Rechenzeit in Abhängigkeit vom Populationsmultiplikator	126
Bild 6-26: Korrelation zwischen Mutationsschrittweiten und Anzahl der Generationen	127
Bild 6-27: Fitnesswert über den Generationenverlauf für 30 Optimierungsvorgänge	129

Abbildungsverzeichnis

Bild 6-28: Positionierungs-Fehler des evolutionären Algorithmus	130
Bild 7-1: Mikros scanner für Laservibrometer: (a) einachsige Variante; (b) zweiachsige Variante (Fraunhofer IZM, iw b)	134
Bild 7-2: Einachsige auslenkbarer Mikrospeigel.....	135
Bild 7-3: Fügeoperationen bei der Montage des Mikros scanners: (a) Füge richtungen im CAD-Modell; (b) Rückansicht der montierten Spiegelbaugruppen	136
Bild 7-4: Baugruppe aus Trägersubstrat, Mikrospeigel und Rahmen mit Messpunkten und Referenzmarken	136
Bild 7-5: Streuung der x- und y-Koordinaten des ersten Referenzpunkts P_{C1} der Baugruppenkomponente „Chip“	137
Bild 7-6: Streuung der x- und y-Koordinaten des zweiten Referenzpunkts der Baugruppenkomponente „Rahmen“	137
Bild 7-7: Versuchsstand zur Laserreflexiven Positionierung	139
Bild 7-8: Kennlinie des Spiegelwinkels in Abhängigkeit von der Steuerspannung und die Näherung der Kennlinie durch ein Taylorpolynom	140
Bild 7-9: Steuerungsarchitektur des Versuchsstands.....	141
Bild 7-10: Positionskalibrierung der LRP-Komponenten, Schritt 1.....	142
Bild 7-11: Positionskalibrierung der LRP-Komponenten, Schritt 2.....	143
Bild 7-12: Positionskalibrierung der LRP-Komponenten, Schritt 3.....	143
Bild 7-13: Kalibrierungsmodul „Ausrichtung Laser“ der Versuchssteuerung	144
Bild 7-14: Vergleich des Referenzmusters mit der Simulation	145
Bild 7-15: Verschiebung des Spiegels in Normalenrichtung.....	147
Bild 7-16: Vergleich des Referenzmusters mit der angepassten Simulation.....	148
Bild 7-17: Integration des analytisch-numerischen Algorithmus	149
Bild 7-18: Integration des evolutionären Algorithmus in den Versuchsstand.....	150
Bild 7-19: Verteilungen der Positionsfehler aus den Versuchen zur LRP auf Basis des analytisch-numerischen Algorithmus	153
Bild 7-20: Verteilung der Relativfehler für drei unterschiedliche Positionen bei 15-facher Ausführung des Genetischen Algorithmus pro Position	156
Bild 7-21: Fitnessentwicklung im Verlauf der Generationen im Versuch	157
Bild 8-1: Vorder- und Rückansicht der Spiegelbaugruppe mit produktseitiger MeMo-Schnittstelle.....	159

Bild 8-2: CAD-Modell des MeMo-Greifers und systemseitige MeMo-Schnittstelle 160

Bild 8-3: Integration der LRP in eine voll automatisierte Mikromontageanlage 160

Bild 8-4: Stückkosten in Abhängigkeit von der Jahresausbringleistung für unterschiedliche Montageszenarien 168

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Bewertung existierende Sensorsysteme zur Bauteilpositionierung	48
Tabelle 5-1: Begriffsdefinitionen der evolutionären Optimierung (NISSEN 2000).....	68
Tabelle 6-1: Eingangsgrößen der Reflexionsmustersimulation.....	82
Tabelle 6-2: Eingangswerte der in Bild 6-6 dargestellten Strahlengangsimulation	88
Tabelle 6-3: Einfluss der translatorischen Freiheitsgrade auf das Reflexionsmuster...	89
Tabelle 6-4: Einfluss der Spiegelwinkel auf das Reflexionsmuster	91
Tabelle 6-5: Randwerte für die Genauigkeitsanalyse	103
Tabelle 6-6: Methodische Unterschiede evolutionärer Hauptformen	114
Tabelle 6-7: Zusammenhang zwischen Parameterabweichung und Fitnesswert	121
Tabelle 6-8: Standardwerte für Evolutionsoperatoren und -parameter (NISSEN 2000)	123
Tabelle 6-9: Generationenanzahl in Abhängigkeit von $\tau_{1/2}$ (ausgewählte Werte).....	125
Tabelle 6-10: Optimierte Werte der Evolutionsoperatoren	128
Tabelle 7-1: Geometrische Größen des kalibrierten Versuchsstands	146
Tabelle 7-2: Genauigkeiten des analytisch-numerischen Algorithmus bei der Positionierung entlang einzelner Roboterachsen.....	152
Tabelle 7-3: Durchschnittliche Positionsfehler des evolutionären Algorithmus im Versuch	155
Tabelle 8-1: Systemkonfiguration und Investitionen für das Montageszenario APM	163
Tabelle 8-2: Systemkonfiguration und Investitionen für das Montageszenario RPR	164
Tabelle 8-3: Systemkonfiguration und Investitionen für das Montageszenario LRP	165
Tabelle 8-4: Gegenüberstellung der monetären Kennzahlen der Montageszenarios APM, RPR und LRP	167

Literatur

ABBE 1904

Abbe, E.: Abhandlungen über die Theorie des Mikroskops. Jena: Fischer 1904. (Gesammelte Abhandlungen 1).

ANGERER 2004

Angerer, T.: Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten. München: Utz 2004.

ARNAU ET AL. 2008

Arnau, A.; Soares, D.: Fundamentals on Piezoelectricity. In: Arnau, A. (Hrsg.): Piezoelectric transducers and applications. Berlin [u.a.]: Springer 2008, S. 1–37. ISBN: 978-3-540-77507-2.

AURICH ET AL. 2009

Aurich, J. C.; Engmann, J.; Schüler, G. M.; Haberland, R.: Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials. In: CIRP (Hrsg.): Annals Manufacturing Technology 2009, S. 311–314.

BÄCK ET AL. 2007

Bäck, T.; Fogel, D. B.; Michalewicz, Z.: Basic algorithms and operators. New York: Taylor & Francis 2007. ISBN: 0750306645.

BARGIEL ET AL. 2010

Bargiel, S.; Rabenoroso, K.; Clévy, C.; Gorecki, C.; Lutz, P.: Towards micro-assembly of hybrid MOEMS components on a reconfigurable silicon free-space micro-optical bench. Journal of micromechanics and microengineering (2010) 20, S. 1–12.

BAUMANN 2006

Baumann, P.: Sensorschaltungen. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage Wiesbaden 2006. ISBN: 3-8348-0059-7.

BEGEMANN ET AL. 1998

Begemann, M.; Ehrfeld, W.; Michel, R.; Weber, L.; Berg, U.: Preadjusted Assembly Magazines. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro system technologies 98. Berlin: VDE-Verl. 1998, S. 676–678. ISBN: 3-8007-2421-9.

BEIL 2002

Beil, A.: Fertigung von Mikro-Bauteilen mittels Stereolithographie. Univ. Hannover, Diss., als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 2002. ISBN: 3-18-361702-1. (Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Universität Hannover 617).

BENGEL 2005

Bengel, M.: Miniaturisierte Produktion. wt-online 03/2005 (2005), S. 127–130.

BERNDT 2007

Berndt, M.: Photogrammetrischer 3D-Bildsensor für die automatisierte Mikromontage. Techn. Univ. Braunschweig, Diss., Aachen: Shaker 2007. ISBN: 9783832267681.

Literatur

BERT ET AL. 2006

Bert, J.; Dembélé, S.; Lefort-Piant, N.: Toward the Vision Based Supervision of Microfactories through Images Mosaicing. In: Ratchev, S. (Hrsg.): Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products. Boston, MA: Springer; International Federation for Information Processing 2006, S. 239–250. ISBN: 978-0-387-31276-7.

BEYELER ET AL. 2007

Beyeler, F.; Neild, A.; Oberti, S.; Bell, D. J.; Yu, S.; Dual, J.; Nelson B.J.: Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field. Journal of microelectromechanical systems 16 (2007) 1, S. 7–15.

BISHOP ET AL. 2001

Bishop, D.; Giles, R.; Aksyuk, V.: Little machines make it BIG. SPIE News - OE Magazine (2001).

BOSBACH 2003

Bosbach, C.: Miniaturisiertes Weißlicht-Interferometer mit hoher Messfrequenz für die absolute Abstandsmessung. Techn. Hochsch. Aachen, Diss., Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-1544-1.

BRECHER ET AL. 2004

Brecher, C.; Peschke, C.: Handhabungstechnik für die Mikromontage. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 09, S. 395–399.

BRECHER ET AL. 2006

Brecher, C.; Peschke, C.; Freundt, M.; Lange, S.: Multi-axes micro gripper for the handling and alignment of flexible micro part. In: Ratchev, S. (Hrsg.): Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products. Boston, MA: Springer; International Federation for Information Processing 2006, S. 11–19. ISBN: 978-0-387-31276-7.

BRONSTEIN ET AL. 2001

Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Bronstein-Semendjajew-Musiol-Mühlig: Taschenbuch der Mathematik. 5., überarb. und erw. Aufl., unveränd. Nachdr. Aufl. Thun: Deutsch 2001. ISBN: 3-8171-2005-2.

BRYCEK ET AL. 1994

Brycek, J.; Petersen, K.; McCulley, W.: Micromachines on the march. In: IEEE (Hrsg.): Spectrum 1994, S. 20–31.

BUDDE ET AL. 2007

Budde, C.; Last, P.; Hesselbach, J.: Development of a Triglide-Robot with Enlarged Workspace. In: IEEE (Hrsg.): Robotics and Automation. Rom 2007, S. 543–548.

BÜTEFISCH 2003

Bütefish, S.: Entwicklung von Greifern für die automatisierte Montage hybrider Mikrosysteme. Techn. Univ. Braunschweig, Diss., Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3832221948.

BÜTTGENBACH ET AL. 2006

Büttgenbach, S.; Hesselbach, J.; Tutsch, R.; Berndt, M.; Hoxhold, B.; Schöttler, K.: Sensor guided handling and assembly of active micro-systems. *Microsystem Technologies* 12 (2006) 07, S. 665–669.

BÜTTGENBACH 1994

Büttgenbach, S.: *Mikromechanik*. 2. durchges. Aufl. Stuttgart: Teubner 1994. ISBN: 3-519-13071-8.

CARROZZA ET AL. 2000

Carrozza, M. C.; Eisinger, A.; Menciassi, A.; Campolo, D.; Micera, S.; Dario, P.: Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices. *Journal of micromechanics and microengineering* 00 (2000) 10, S. 271–276.

CECIL ET AL. 2007

Cecil, J.; Powell, D.; Vasquez, D.: Assembly and manipulation of micro devices - A state of the art survey. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007), S. 580–588.

CHEN ET AL. 2005

Chen, J.; Lu, Y.; Yang, P.: Integrated fabrication of an electrostatic microactuator for HDD R/W head positioning. *Microsystem Technologies Volume 11* (2005) 8, S. 612–615.

CHOLLET ET AL. 1999

Chollet, S.; Jacot, J.: Cost Efficient Assembly of Microsystems. *MST news* (1999) 1, S. 30–32.

CHU ET AL. 2010

Chu, H. M.; Tokuda, T.; Kimata, M.; Hane, K.: Compact Low-Voltage Operation Micromirror Based on High-Vacuum Seal Technology Using Metal Can. *Journal of microelectromechanical systems* 19 (2010) 4, S. 927–935.

CLAUBNITZER 2004

Claußnitzer, H.: *Direkt zu Dynamik und Präzision*. elektro AUTOMATION (2004) 11, S. 24.

CLEVY ET AL. 2004

Clevy, C.; Hubert, A.; Chaillet, N.: A New Micro-tools Exchange Principle for Micromanipulation. In: IEEE (Hrsg.): *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Sendai, Japan 2004, S. 230–234.

CONN ET AL. 2000

Conn, A. R.; Gould, N. I.; Toint, P. L.: *Trust-region methods*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics 2000. ISBN: 0898714605.

COOPER ET AL. 1998

Cooper, K. A.; Yang, R.; Mottet, J. S.; Lecarpentier, G.: Flip Chip Equipment for High End Electro-Optical Modules. In: IEEE (Hrsg.): *Electronic Components and Technology Conference* 1998, S. 176–180.

Literatur

DEGEN ET AL. 2004

Degen, R.; Slatter, R.: Spielfreie Mikrogetriebe und Antriebe für präzise Positionieranwendungen. In: Huth, G. (Hrsg.): Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik. Berlin: VDE-Verl. 2004, S. 99–106. ISBN: 3800728168.

DEMTRÖDER 2010

Demtröder, W.: Experimentalphysik. 4., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-03910-2.

DENAVIT ET AL. 1955

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

DEVOS ET AL. 2004

Devos, S.; van de Vijver, W.; Mesonero-Romanos Vivanco, D.; Reynaerts, D.; van Brussel, H.: Piezoelectric Motors with a Stepping and a Resonant Operation Mode. In: HVG (Hrsg.): Proceedings of Actuator 2004 - 9th International Conference on New Actuators. Bremen 2004, S. 439–442.

DEVOS ET AL. 2003

Devos, S.; Volder, M. de; Reynaerts, D.; van Brussel, H.: A Piezoelectric Drive combining a Resonant and a Stepping Positioning Mode. In: RWTH (Hrsg.): Proceedings of the International Topical Conference on Precision Engineering, Micro Technology, Measurement Techniques and Equipment. Aachen 2003, S. 109–112.

DILTHEY 2005

Dilthey, U.: Montage Hybrider Mikrosysteme. Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 3-540-23706-2.

DIN 2003

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 09-2003.

DIN 2004A

DIN 23564-1: Fertigungsmittel für Mikrosysteme - Begriffe - Teil 1: Allgemeine Begriffe der Mikrosystemtechnik. Berlin: Beuth 2004-05.

DIN 2004B

DIN 32564-2: Fertigungsmittel für Mikrosysteme - Begriffe - Teil 2: Basistechnologien und Herstellung. Berlin: Beuth 2004-05.

DITTRICH 2004

Dittrich, S.: Sensorgeführte Präzisionsmikromontage. Techn. Univ. Braunschweig, Diss., Essen: Vulkan-Verl. 2004. ISBN: 3-8027-8679-3.

DONGES 2007

Donges, A.: Physikalische Grundlagen der Lasertechnik. 3. Aufl. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 3-8322-6392-6.

DORSCH ET AL. 1994

Dorsch, R. G.; Häusler, G.; Herrmann, J. M.: Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. Applied Optics 33 (1994) 7, S. 1306–1314.

DRIESSEN ET AL. 2004

Driessen, S.; Engelmann, B.: Methoden und Sensoren zur Überwachung von Handhabungs- und Fügeprozessen in der Mikrosystemtechnik. *Technisches Messen* 7-8 (2004) 71, S. 404–416.

DRIESSEN 2008

Driessen, S. H.: Faseroptisches Streifenprojektionssystem zur Inline-Erfassung von 3D-Oberflächengeometrien für die Mikromontage. *Techn. Hochsch. Aachen, Diss.*, Aachen: Apprimus-Verl. 2008. ISBN: 9783940565082.

DUSSLER 2003

Dussler, G.: Strategien zur Visualisierung mikroskopischer Bauteile und Strukturen mit einem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop. *Techn. Hochsch. Aachen, Diss.*, Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3832212981. (Berichte aus der Produktionstechnik 2003,7).

EBERHARDT ET AL. 1999

Eberhardt, R.; Scheller, T.: Montage Mikrooptischer Systeme. In: Milberg, J. et al. (Hrsg.): *Automatisierte Mikromontage*. München: Utz 1999, S. 7-1 bis 7-15. ISBN: 3-89675-044-5.

EBERHARDT ET AL. 1997

Eberhardt, R.; Scheller, T.; Tittelbach, G.; Guyenot, V.: Automated assembly of microoptical components. In: SPIE (Hrsg.): *Microrobotics and Microsystem Fabrication 1997*, S. 117–127.

ECUYER ET AL. 2009

Ecuyer, P. L.; Owen, A. B.: *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods*. 1. Aufl. Aufl. s.l.: Springer-Verlag 2009. ISBN: 364204106X.

EHRENSTRABER 2008

Ehrensträßer, M.: Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage. *Techn. Univ. München, Diss.*, München: Utz 2008. ISBN: 9783831607433. (Forschungsberichte IWB 206).

EHRFELD ET AL. 1993

Ehrfeld, W.; Kämper, K. P.; Lehr, H.; Michel, F.: LIGA-Technik zur Fertigung von Mikroaktoren. *Mikroelektronik* (1993) 7, S. LXIX–LXXI.

EIBEN ET AL. 2007

Eiben, A. E.; Smith, J. E.: *Introduction to evolutionary computing*. corr. 2. print. Edition. New York/Berlin: Springer 2007. ISBN: 3540401849. (Natural computing series).

ELDERS ET AL. 2001

Elders, J.; Spiering, V.; Walsh, S.: Microsystems technology (MST) and MEMS applications - An overview. *MRS Bulletin* vol. 26. (2001) 4, S. 312–315.

ELLIPTEC RESONATOR ACTUATORS 2009

Elliptec Resonator Actuators: Highly dynamic XY-stage using the Elliptec Motor X15G. <http://www.elliptec.com/fileadmin/elliptec/User/Unternehmen/Newsletter/INT_NL_07_2008.pdf> - 23.03.2011.

Literatur

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA 2010

Encyclopedia Britannica: Encyclopaedia Britannica 2010 Deluxe Edition DVD: Encyclopedia Britannica 2010. ISBN: 1615353178.

ENGEL 2002

Engel, A.: Elektronisch messen, steuern, regeln. <<http://www.nano-world.org/Events/dpkkurs2002/de/Elektronikkurs>> - 10.01.2011.

ENIKOV ET AL. 2003

Enikov, E. T.; Clark, S.; Minkov, L.: Micro-Assembly cell with dual optical computer vision control for electrostatic gripping of MEMS. In: SPIE (Hrsg.): Intelligent Robots and Computer Vision XXI: Algorithms, Techniques and Active Vision. Providence, Rhode Island, USA 2003, S. 269–280.

EPSON 2009

Epson: Epson Roboter. <http://content.epson.de/fileadmin/content/files/Robots/PDF/Downloads/Industrieroboter/Komplett_de.pdf> - 26.01.2010.

ERNE 2005

Erne, H.: Die Miniaturfabrik – Der wirtschaftliche Einstieg in die Mikromontage. (Hrsg.): 6. Fachtagung Mikroproduktionstechnik Karlsruhe. München: Hanser 2005.

FAN ET AL. 2000

Fan, K. C.; Zhao, Y.: A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques. Machine Tools & Manufacture 40 (2000), S. 2073–2081.

FATIKOW 2000

Fatikow, S.: Mikroroboter und Mikromontage. Stuttgart: Teubner 2000. ISBN: 3-519-06264-X.

FATIKOW ET AL. 2000

Fatikow, S.; Seyfried, J.; St. Fahlbusch; Buerkle, A.; Schmoeckel, F.: A Flexible Microrobot-Based Microassembly Station. Journal of Intelligent and Robotic Systems 27 (2000) 1-2, S. 135–169.

FEDDEMA ET AL. 1998A

Feddema, J.; Simon, R. W.: Microassembly of micro-electro-mechanical systems (MEMS) using visual servoing. In: Kriegman, D. J. (Hrsg.): The confluence of vision and control. London/Berlin: Springer 1998, S. 257–272. ISBN: 978-1-85233-025-5.

FEDDEMA ET AL. 1998B

Feddema, J. T.; Simon, R. W.: Visual Servoing and CAD-Driven Microassembly. Robotics & Automation Magazine Vol. 5 (1998) 4, S. 18–24.

FENG ET AL. 2006

Feng, W.; Fuh, J. Y.; Wong, Y. S.: Development of A Drop-on-Demand Micro Dispensing System. Materials and Science (2006) 505-507, S. 25–30.

FERREIRA ET AL. 1999

Ferreira, L. O.; Moehlecke, S.: A silicon micromechanical galvanometric scanner. Sensors and Actuators A: Physical 1999 (1999) 73, S. 252–260.

FISCHER 1997

Fischer, R.: Entwicklung von Greif- und Spannvorrichtungen für die automatisierte Montage von Mikrobauteilen. Univ. Kaiserslautern, Diss., Düsseldorf: VDI Verlag 1997. ISBN: 3-18-329201-7.

FLUITMANN 1994

Fluitmann, J.: Micro System Technology. In: IEEE (Hrsg.): Custom Integrated Circuits - Proceedings of the IEEE Conference 1994. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers 1994, S. 471–478. ISBN: 0-7803-1886-2.

FRANK 1976

Frank, P. M.: Empfindlichkeitsanalyse dynamischer Systeme. München: Oldenbourg 1976. ISBN: 3-486-34811-6.

FUGERE 2001

Fugere, J.: Microdispensing Pastes and Adhesives. The Magazine of High-Density Interconnect 04 (2001) 10, S. 16-18

GAUGEL ET AL. 2004

Gaugel, T.; Bengel, M.; Malthan, D.: Building a mini-assembly system from a technology construction kit. Assembly Automation 03/04 (2004) 23, S. 43–48.

GERLACH ET AL. 2002

Gerlach, A.; Knebel, G.; Guber, A. E.; Hecke, M.; Herrmann, D.; Muslija, A.; Schaller, T.: Microfabrication of single-use plastic microfluidic devices for high-throughput screening and DNA analysis. Microsystem Technologies Vol. 7 (2002) No. 5/6, S. 265–268.

GERLACH ET AL. 2006

Gerlach, G.; Dötzel, W.: Einführung in die Mikrosystemtechnik: Hanser, Carl 2006. ISBN: 3446225587.

GESSNER ET AL. 2006

Gessner, T.; Bonitz, J.; Kaufmann, C.; Kurth, S.; Specht, H.: MEMS based micro scanners: components, technologies and applications. In: WFB Wirtschaftsförderung Bremen GmbH (Hrsg.): ACTUATOR 2006 - 10th International Conference on New Actuators. Bremen 2006, S. 193–198.

GEVATTER ET AL. 2006

Gevatter, H.-J.; Grünhaupt, U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. 2., vollständig bearbeitete Auflage. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 3540212078.

GILLNER 2000

Gillner, A.: Trends bei Laseranwendungen in Mikro- und Elektrotechnik. In: Fraunhofer Institut für Lasertechnik (Hrsg.): Aachener Kolloquium für Lasertechnik. Aachen 2000, S. 241–252.

GIBLER 2005

Gißler, J.: Elektrische Direktantriebe. München: Franzis 2005. ISBN: 3-7723-5007-0.

Literatur

GOODWIN ET AL. 1992

SCHUTZRECHT: USA 5080549 (14.01.1992). Epsilon Technology Inc. Pr.: 547463
Goodwin, D. L.; Crabb, R.; Robinson, M.; Ferro, A. P.: Wafer Handling System with Bernoulli Pick-Up.

GÖTZE ET AL. 2007

Götze, H.; Pagel, L.: Entwicklung eines Mikromanipulators auf Basis der Piezotechnologie. In: Geßner, T. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik Kongress 2007. Berlin: VDE-Verl. 2007, S. 691–694. ISBN: 9783800730612.

GÖTZEN 1998

Götzen, R.: 3D-Strukturen schnell umgesetzt. F&M Feinwerktechnik und Messtechnik 106 (1998) 3, S. 134–136.

GRIMME ET AL. 1998

Grimme, R.; Schmutz, W.; Schlenker, D.; Schuenemann, M.; Stock, A.; Schaefer W.: Modular magazine for suitable handling of microparts in industry. In: SPIE (Hrsg.): Microtransportation and Manufacturing Concepts 1998, S. 157–167.

GRUTZECK ET AL. 2000

Grutzeck, H.; Kiesewetter, L.: Athletische Kapillarkräfte. F&M Feinwerktechnik und Messtechnik 108 (2000) 9, S. 90–94.

GRUTZECK ET AL. 2002

Grutzeck, H.; Kiesewetter, L.: Downscaling of grippers for micro assembly. Microsystem Technologies (2002) 8, S. 27–31.

HABENICHT 2006

Habenicht, G.: Kleben : Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 5., erweiterte und aktualisierte Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer 2006.

HACKELE ET AL. 1994

Hackele, M.; Bacher, W.; Blum, H.; Müller, L.; Ünal, N.: Heißprägen von Mikrostrukturen als Fertigungsprozess. F&M Feinwerktechnik und Messtechnik 105 (1994) 9, S. 598–602.

HAINZL ET AL. 2001

Hainzl, H.; Nicolis, J.: Miniaturisierung – der Motor der Entwicklung in der Elektronik. E&I Elektronik und Informationstechnik (2001) 118, S. 69–80.

HAMAMATSU 2003

Two Dimensional PSD S1200, S1300, S1880. S1881, S2044. Hamamatsu City: 2003.

HANE ET AL. 2008

Hane, K.; Sasaki, M.: Micro-Mirrors. In: Elsevier Science et al. (Hrsg.): Comprehensive Microsystems. Amsterdam: Elsevier 2008, S. 1–63. ISBN: 978-0-444-52190-3.

HANKE-BOURGEOIS 2009

Hanke-Bourgeois, M.: Grundlagen der Numerischen Mathematik und des Wissenschaftlichen Rechnens. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2009. ISBN: 978-3-8348-9309-3.

HANKES 1998

Hankes, J.: Sensoreinsatz in der automatisierten Mikromontage. Univ. Kaiserslautern, Diss., Düsseldorf: VDI Verlag 1998. ISBN: 3-18-345902-7.

HARMAN 2010

Harman, G. G.: Wire bonding in microelectronics. 3rd ed. Aufl. New York: McGraw-Hill Professional 2010. ISBN: 9780071476232.

HARSH ET AL. 1999

Harsh, K. F.; Bright, V. M.; Lee, Y. C.: Solder self-assembly for three-dimensional microelectromechanical systems. Sensors and Actuators A: Physical 77 (1999), S. 237–244.

HÄUSLER ET AL. 1988

Häusler, G.; Schneider, G.: Testing optics by experimental ray tracing with a lateral effect photodiode. Applied Optics 27 (1988) 24, S. 5160–5164.

HECHT 2009

Hecht, E.: Optik. 5. Aufl. München: Oldenbourg 2009. ISBN: 3-486-58861-3.

HEIMBACH 2003

Heimbach, S.: Automatisierung mit intelligenter Bildverarbeitung. Industry Automation and Drive Technologies. <http://www.automation.siemens.com/_de/portal/news/products_detail.htm?rssItemURL=/detail_rss.php3?template_id=218&id=4976> - 13.05.2011.

HEINZ 2012

Heinz, M.: Methoden zur Auslegung der Berührungslosen Handhabung. Techn. Univ. München, Diss., München: Utz 2012. ISBN: -. (Forschungsberichte IWB -).

HESSE 1993

Hesse, S.: Montagemaschinen. 1. Aufl. Aufl. Würzburg: Vogel 1993. ISBN: 3-8023-1405-0. (Kamprath-Reihe).

HESSE ET AL. 2006

Hesse, S.; Schäffel, C.: Nanopositioniertechnik für große Bewegungsbereiche. Technisches Messen 73 (2006) 9, S. 493–499.

HESSE 1991

Hesse, S.: Greifer-Praxis. 1. Aufl. Aufl. Würzburg: Vogel 1991. ISBN: 3-8023-0476-4.

HESELBACH ET AL. 2002A

Hesselbach, J.; Dittrich, S.; Becker, O.: Sensorgeführte Mikromontage mit Parallelrobotern. In: ISoM (Hrsg.): Proceedings Advanced Driving Systems. Chemnitz 2002, S. 229–238.

HESELBACH ET AL. 1997

Hesselbach, J.; Pittschellis, R.: Miniaturgreifer mit Greifkraftmessung für die Mikromontage. VDI-Bericht (1997) 1315, S. 335–348.

Literatur

HESELBACH ET AL. 2002B

Hesselbach, J.; Raatz, A.: MikroPRO. Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Essen: Vulkan-Verl. 2002. ISBN: 3-8027-8669-6. (Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig).

HESELBACH ET AL. 1998

Hesselbach, J.; Thoben, R.; Pokar, G.; Ritter, R.; Reich, C.: Visual Control and Calibration of Parallel Robots for Micro Assembly. In: SPIE (Hrsg.): Microrobotics and Micromanipulation. Boston 1998, S. 50–61.

HESELBACH ET AL. 2008

Hesselbach, J.; Tutsch, R.; Raatz, A.: Sensorführung von Mikromontageprozessen. Braunschweig (2008), S. 349-398

HESELBACH ET AL. 2006

Hesselbach, J.; Wrege, J.; Raatz, A.: Mikromontage. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin/Heidelberg: Springer 2006, S. 463–482. ISBN: 978-3-540-21413-7.

HESELBACH ET AL. 2007

Hesselbach, J.; Wrege, J.; Raatz, A.: Micro Handling Devices Supported by Electrostatic Forces. In: CIRP (Hrsg.): Annals of the CIRP: Elsevier Acad. Press 2007, S. 45–48.

HILLERINGMANN 2006

Hilleringmann, U.: Mikrosystemtechnik. <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8351-9022-1>> - 20.11.2010

HOCH 2009

Hoch, A.: Spannen und Handhaben in der spanenden Feinstbearbeitung mikrooptischer Bauteile. In: Bayern Photonics (Hrsg.): Workshop Mikrooptische Systeme. Nürnberg 2009, S. 32–46.

HOFERICHTER 2006

Hoferichter, A.: Kräftig und sensibel zugleich. Pictures of the Future Frühjahr 2006 - Elektromaschinen. S. 64-65

HOFFMANN 1997

Hoffmann, H. J.: Optische Werkstoffe. In: Litfin, G. (Hrsg.): Technische Optik in der Praxis: Springer, Berlin 1997, S. 137–172. ISBN: 3540606130.

HÖHN 2001

Höhn, M.: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme: Utz, Herbert 2001. ISBN: 3831600120.

HÖPPNER 2002

Höppner, J.: Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler. Techn. Univ. München, Diss., München: Herbert Utz Verlag 2002. ISBN: 3-8316-0125-9.

HOXHOLD ET AL. 2007

Hoxhold, B.; Burisch, A.; Büttgenbach, S.: Pneumatische Mikrogreifer für die Präzisionsmontage. In: Geßner, T. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik Kongress 2007. Berlin: VDE-Verl. 2007, S. 659–662. ISBN: 9783800730612.

HOXHOLD ET AL. 2008

Hoxhold, B.; Büttgenbach, S.: Batch fabrication of micro grippers with integrated actuators. *Microsystem Technologies* 14 (2008) 12, S. 1917–1924.

HOXHOLD ET AL. 2005

Hoxhold, B.; Leester-Schädel, M.; Büttgenbach, S.: Fabrication of Differential SMA Driven Micro Grippers in Batch-Technology. In: euspen (Hrsg.): Proceedings of the 5th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology. Montpellier, France 2005, S. 325–328.

HSU 2004

Hsu, T.-R.: MEMS packaging. Institution of Electrical Engineers. London: INSPEC The Institution of Electrical Engineers 2004. ISBN: 0863413358.

HÜGEL ET AL. 2009

Hügel, H.; Graf, T.: Laser in der Fertigung. 2., neu bearbeitete Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2009. ISBN: 978-3-8351-0005-3.

ISO 11146-3 2004

ISO 11146-3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods. In: International Organization for Standardization (Hrsg.): Lasers and laser-related equipment. Genève: ISO 2004-2005.

JACOB 2002

Jacob, D.: Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik. Techn. Univ. München, Diss., München: Utz 2002. ISBN: 3-8316-0142-9. (Forschungsberichte IWB 167).

JÄGER ET AL. 2006

Jäger, G.; Hausotte, T.; Büchner H.J.; Manske, E.; Schmidt, I.; Mastlylo, R.: Long-range nanopositioning and nanomeasuring machine for application to micro- and nanotechnology. In: SPIE (Hrsg.): Proceedings of SPIE 2006, S. 1–9.

JANOCHA 1993

Janocha, H.: Moderne Aktoren und Sensoren in der Automatisierungstechnik - Grundlagen und Anwendungen. In: VDI/VDE (Hg.): VDE-Saar-Fachseminar für Ingenieure, Entwickler Konstrukteure und Techniker. Saarbrücken 27. und 28. September. Saarbrücken: VDE-Verl.,

JARRE ET AL. 2004

Jarre, F.; Stoer, J.; Jarre-Stoer: Optimierung. Heidelberg/Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-540-43575-1.

JENDRITZA 2010

Jendritza, D. J.: Technischer Einsatz Neuer Aktoren: expert-verlag 2010. ISBN: 3816927653.

JENNEWEIN ET AL. 2000

Jennewein, H.; Gottschling, H.; Tschudi, T.: Absolute Distanzmessung mit einem faseroptischen Interferometer. *Technisches Messen* 67 (2000) 10, S. 410–414.

Literatur

JOHN ET AL. 2005

John, L. G.; Schott, W.; Jäger, G.; Klein, G.; Pause, S.; Berg, C.; Rittner, J.: Simultane Mehrgrößenmikrosensorsysteme für den Präzisionsmaschinenbau. *mst online* (2005) 62, S. 1–4.

JOHNSON ELECTRIC - NANOMOTION 2009

Johnson Electric - Nanomotion: How it works. <<http://www.nanomotion.com/>> - 04.03.2010.

JUNGNICKEL 2008

Jungnickel, D.: Optimierungsmethoden. 2. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer; Springer-Verlag 2008. ISBN: 978-3-540-76790-9.

KATTNER ET AL. 1977

SCHUTZRECHT: United States 4065717 (27.12.1977). Signetics Corporation Pr.: 380859 Kattner, L. E.; Youmans, A. P.; Shasby, P. J.: Multi-Point Microprobe for Testing Integrated Circuits.

KERLE ET AL. 2001

Kerle, H.; Helm, M.; Soetebier, S.: Vom Bandgetriebe zur Spreizbandmechanik - die Entwicklung eines neuen Maschinenelements. *Wiss. Zeitschrift TU Dresden* 50 (2001) 3, S. 83–88.

KIANG ET AL. 1996

Kiang, M.-H.; Solgaard, O.; Muller, R. S.; Lau, K. Y.: Micromachined Polysilicon Microscanners for Barcode Readers. *IEEE Photonics Technology Letters* 8 (1996) 12, S. 1707–1709.

KIM ET AL. 2004

Kim, D. H.; Kim B.; Kang, H.: Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation. *Microsystem Technologies* 2004 (2004) 10, S. 275–280.

KIM ET AL. 2009

Kim, J. H.; Rhyu, S. H.; Jung, I. S.; Seo, J. M.: An investigation on development of precision actuators for small robots. In: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) (Hrsg.): *Electrical And Computer Engineering*. Stevens Point, USA: WSEAS 2009, S. 62–66.

KLEMENT 2009

Klement, J.: *Technologie der elektrischen Direktantriebe*. Renningen: expert-Verl. 2009. ISBN: 978-3-8169-2822-5.

KOCHAN 1997

Kochan, A.: European project develops “ice” gripper for micro-sized components. *Assembly Automation* 2 (17), 1997, S. 114-115

KOHL ET AL. 2002

Kohl, M.; Krevet, B.; Just, E.: SMA Microgripper System. *Sensors and Actuators A: Physical* (2002), S. 646–652.

KOLONKO 2008

Kolonko, M.: *Stochastische Simulation*. 1. Aufl. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2008. ISBN: 9783835102170.

KORB 2002

Korb, W.: Wirtschaftliche und fehlertolerante Mikromontage. INNO Innovative Technik – Anwendungen aus Nordrhein-Westfalen 7 (2002) 23, S. 16–17.

KRATOCHVIL ET AL. 2004

Kratochvil, B. E.; Yesin, K. B.; Hess, V.; Nelson, B. J.: Design of a Visually Guided 6 DOF Micromanipulator System for 3D Assembly of Hybrid MEMS. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Workshop on Microfactories 2004.

KRAUSE 2004

Krause, W.: Feinwerktechnische Schneckengetriebe. In: Schiele & Schön (Hrsg.): Jahrbuch für Optik und Feinmechanik. Berlin: Schiele & Schön 2004, S. 105–115. ISBN: 3794907108.

KÜHLKE 2011

Kühlke, D.: Optik. 2., überarb. und erw. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch (Harri) 2011. ISBN: 3817117418.

LANGEN ET AL. 1995

Langen, H. H.; Masuzawa, T.; Fujino, M.: Modular Method for Microparts Machining and Assembly with Self-Alignment. In: CIRP (Hrsg.): Annals of the CIRP 1995, S. 173–176.

LAUBER ET AL. 1999

Lauber, R.; Göhner, P.: Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer- und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung, Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. 3., völlig Neubearb. Aufl. Aufl. Berlin: Springer 1999. ISBN: 354065318x.

LI ET AL. 2008

Li, L.; Ng, J. H.; Fuh, J. Y.; Wong, Y. S.; Loh, H. T.; Feng, W.; Saedan, M.; Sun, J.; Thoroddsen, S. T.; Lu, L.: Development of A Drop-on-Demand System for Multiple Material Dispensing. In: IEEE (Hrsg.): Conference on Automation and Logistics. Qingdao, China 2008, S. 61–66.

LOTTER ET AL. 2006

Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006. ISBN: 978-3-540-21413-7.

LOY 2010

Loy, M.: Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung. Techn. Univ. München, Diss., 2010. München: Utz 2010. ISBN: 978-3-8316-4027-0.

LUHMANN 2000

Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie. Heidelberg: Wichmann 2000. ISBN: 387907321x.

LUNZE 2008

Lunze, J.: Automatisierungstechnik. 2., überarb. Aufl. Aufl. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 9783486580617.

Literatur

LUTZE ET AL. 2004

Lutze, T.; Perneczky, A.: Mikrosystemtechnik zum Einsatz in der Minimal Invasiven Endoskop-Assistierten Neurochirurgischen Operationstechnik. In: de Gruyter (Hrsg.): Biomedizinische Technik. Berlin u.a.: de Gruyter 2004, S. 556–557.

MA 1999

Ma, K.: Greif- und Fügekraftmessung mit faseroptischen Sensoren in der Mikromontage: Vulkan-Verlag GmbH 1999. ISBN: 3802786416.

MABOUDIAN ET AL. 1997

Maboudian, R.; Howe, R. T.: Critical Review: Adhesion in surface micromechanical structures. Journal of Vacuum Science and Technology 15 (1997) 1, S. 1–20.

MADDIX ET AL. 2001

SCHUTZRECHT US 6232143 B1 (15.05.2001). International Business Machines Pr.: 09/448110. Maddix, J. T.; Palangonia, A. M.; Bikna, P. J.; Vallet, D. P.: Micro Probe Ring Assembly and Method of Fabrication.

MÄKYNEN 2000

Mäkynen, A.: Position-sensitive devices and sensor systems for optical tracking and displacement sensing applications. Oulu: Univ. Press 2000. ISBN: 9514257790.

MALUKHIN ET AL. 2008

Malukhin, K.; Ehmann, K.: Development of a Monolithic Shape Memory Alloy Manipulator. In: Ratchev, S. et al. (Hrsg.): Micro-Assembly Technologies and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 243–250. ISBN: 9780387774022.

MANDESTAM 1907

Mandestam, L.: Über optisch homogene und trübe Medien. In: WILEY (Hrsg.): Annalen der Physik: Wiley-VCH 1907, S. 628–642.

MARTEL 2001

Martel, S. M.: General description of the wireless miniature NanoWalker robot design for atomic scale operations. In: SPIE (Hrsg.): Microrobotics and Microassembly III 2001, S. 231–251.

MASUZAWA ET AL. 1997

Masuzawa, T.; Tönshoff, H. K.: Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools. In: CIRP (Hrsg.): Annals of the CIRP 1997, S. 621–628.

MATTHES 2003

Matthes, K.-J.: Fügetechnik. Leipzig: Fachbuchverl. 2003. ISBN: 3-446-22133-6.

MCINTYRE ET AL. 1970

SCHUTZRECHT 3714491 (13.04.1970). RCA Limited Pr.: 27618. McIntyre, R. J.; Springings, H. C.: Quadrant Photodiode.

MENZ ET AL. 2005

Menz, W.; Mohr, J.; Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. 3., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2005. ISBN: 3-527-30536-X.

MEYBERG ET AL. 2009

Meyberg, K.; Vachenauer, P.; Meyberg, K.; Vachenauer, P.: Höhere Mathematik: Differential- und Integralrechnung, Vektor- und Matrizenrechnung. 6., korr. Aufl., 1., korr. Nachdr., Berlin: Springer 2009. ISBN: 3540418504.

MEYER 2001

Meyer, W.: Micro Dispensing of Adhesives and other Polymers. In: IEEE (Hrsg.): Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics 2001, S. 35–39.

MICHAELI ET AL. 1998

Michaeli, W.; Rogalla, A.; Spennemann, A.; Ziegmann, C.: Mikrostrukturierte Formteile aus Kunststoff gestalten. F&M Feinwerktechnik und Messtechnik 106 (1998) 9, S. 642–645.

MIESNER ET AL. 2009

Miesner, J.; Timmermann, A.; Meinschien, J.: Automated Assembly of Fast Axis Collimation (FAC) Lenses for Diode Laser Bar Modules. In: Zediker, M. S. (Hrsg.): High-power diode laser technology and applications VII. Bellingham, Wash.: SPIE 2009. ISBN: 9780819474445.

MINIKES ET AL. 2004

Minikes, A.; Bucher, I.; Haber, S.: Levitation force induced by pressure radiation in gas squeeze films. Journal of the Acoustical Society of America 116 (2004) 1, S. 217–226.

MITSUBISHI ELECTRIC 2001

Mitsubishi Electric: Mitsubishi Industrial Robot RP Series Application Guide. 2001.

MITSUBISHI ELECTRIC 2010

Mitsubishi Electric: MELFA Roboter – RP-Serie. Mitsubishi 2011. <http://www.mitsubishi-automation.de/products/robots_RP.html?distributor=0> - 09.11.2011.

MOHAUPT ET AL. 2010

Mohaupt, M.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.: Alignment Procedures for Micro-optics. (Hrsg.): Precision assembly technologies and systems. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 143–150. ISBN: 978-3-642-11597-4.

MOHR 2005

Mohr, J.: Montiert wird in der Tischfabrik. Industrieanzeiger (2005) 16, S. 37–39.

MULLER ET AL. 1998

Muller, R. S.; Lau, K. Y.: Surface-Micromachined Microoptical Elements and Systems. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the IEEE 1998, S. 1705–1720.

MULLING ET AL. 2001

Mulling, J.; Usher, T.; Dessent, B.; Palmer, J.; Franzon, P.; Grant, E.; Kingon, A.: Load characterization of high displacement piezoelectric actuators with various end conditions. In: Elsevier Science (Hrsg.): Sensors and Actuators A: Physical 2001, S. 19–24.

MURE-DUBOIS ET AL. 2006

Mure-Dubois, J.; Hügli, H.: Embedded 3D vision system for automated microassembly. In: SPIE (Hrsg.): Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology IV 2006, S. 63820J.

Literatur

NAH ET AL. 2007

Nah, S. K.; Zhong, Z. W.: A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation. *Sensors and Actuators A: Physical* 133 (2007) 1, S. 218–224.

NAJAFI 2003

Najafi, K.: Micropackaging Technologies for Integrated Microsystems: Applications to MEMS and MOEMS. In: SPIE (Hrsg.): *Micromachining and Microfabrication Process Technology VIII*, Proceedings of SPIE 2003, S. 1–19.

NEXUS 2005

Nexus: Market analysis for microsystems III : a NEXUS Task Force Report. Grenoble: The Nexus Association 2005. ISBN: 2-9518607-2-2.

NIENHAUS 1999

Nienhaus, M.: Verfahren und Werkzeuge für die Montage hybrider Mikrosysteme. In: Milberg, J. et al. (Hrsg.): *Automatisierte Mikromontage*. München: Utz 1999, S. 4.1-4.25. ISBN: 3-89675-044-5.

NISSEN 2000

Nissen, V.: *Einführung in Evolutionäre Algorithmen*. Braunschweig: Vieweg+Teubner; Vieweg 2000. ISBN: 3528054999.

OECHSNER ET AL. 2004

Oechsner, U.; Polze, S.; Federau, G.: Laserlichtschnitt - eine Schlüsselfunktion in der Lasermesstechnik. *Photonik* 4/2004 (2004), S. 66–69.

O'GRADY ET AL. 1988

O'Grady, P. J.; Junge, H. D.; Boden, S.: *Automatisierte Fertigungssysteme*. 1. Aufl. Aufl. Weinheim: VCH 1988. ISBN: 3-527-26895-2. (Informationstechnologie).

OH 1998

Oh, H.-S.: *Elektrostatische Greifer für die Mikromontage*. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1998. ISBN 9783183702084. (Fortschritts-Berichte VDI Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik 702)

PARK ET AL. 1999

Park, W. S.; Cho, H. S.; Byun, Y. K.; Park, N. Y.; Jung, D. K.: Measurement of 3-D position and orientation of rigid bodies using a 3-facet mirror. In: SPIE (Hrsg.): *Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology and Inspection*. Boston 1999.

PEDERSINI ET AL. 1997

Pedersini, F.; Sarti, A.; Tubaro, S.: Estimation and Compensation of Subpixel Edge Localization Error. In: IEEE (Hrsg.): *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1997, S. 1278–1284.

PEGGS ET AL. 1999

Peggs, G. N.; Lewis, A. J.; Oldfield, S.: Design for a Compact High-Accuracy CMM. In: CIRP (Hrsg.): *Annals Manufacturing Technology* 1999, S. 417–420.

PETERSEN 2003

Petersen, B.: *Flexible Handhabungstechnik für die automatisierte Mikromontage*. Techn. Hochsch. Aachen, Diss., Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-1815-7.

PETROVIC ET AL. 2002

Petrovic, D.; Popovic, G.; Chatzitheodoridis, E.; Del Medico, O.; Almansa, A.; Sümeecz, F.; Brenner, W.; Detter, H.: Gripping Tools for Handling and Assembly of Microcomponents. In: IEEE (Hrsg.): Proc. 23rd International Conference on Microelectronics. Nis 2002, S. 247–250.

PFEIFER ET AL. 2001

Pfeifer, T.; Freudenberg, R.; Dussler, G.; Bröcher, B.: Quality control and process observation for the micro assembly process. Measurement 30 (2001), S. 1–18.

PHYSIK INSTRUMENTE (PI) 2010

Physik Instrumente (PI): Piezo-Walk@Working Principle. <http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo_motor/nexline.php> - 19.02.2011

PHYSIK INSTRUMENTE (PI) 2008

Physik Instrumente (PI): Tools for Microscopy, Imaging, Biotech. Karlsruhe: 2008.

PISTER ET AL. 1992

Pister, K. S.; Judy, M. W.; Burgett, S. R.; Fearing, R. S.: Microfabricated Hinges. Sensors and Actuators A: Physical 33 (1992), S. 249–256.

PITSHELLIS 1998

Pitschellis, R.: Mechanische Miniaturgreifer mit Formgedächtnisantrieb. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1998. ISBN: 3183714086.

POHLHEIM 2000

Pohlheim, H.: Evolutionäre Algorithmen. Berlin: Springer 2000. ISBN: 3-540-66413-0.

POKAR 2004

Pokar, G.: Untersuchung zum Einsatz von ebenen Parallelrobotern in der Mikromontage. Essen: Vulkan-Verl. 2004. ISBN 9783802786808 (Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig)

POLYTEC 2010

Polytec: Faseroptisches Interferometer OFV-55x. Waldbronn: 2010.

PÖSCHEL ET AL. 2006

Pöschel, W.; Dontyov, D.; Manske, E.: Der Geometrie auf der Spur. Laser und Photonik 2/2006 (2006) 2, S. 1–4.

POWELL 1970

Powell, M. J. D.: A Fortran subroutine for unconstrained minimization, requiring first derivatives of the objective function. Harwell: United Kingdom Atomic Energy Authority 1970

PROBST ET AL. 2006

Probst, M.; Vollmers, K.; Kratochvil, B. E.; Nelson, B. J.: Design of an Advanced Microassembly System for the Automated Assembly of Bio-Microrobots. (Hrsg.): Proc. 5th International Workshop on Microfactories 2006.

RÅDE ET AL. 2003

Råde, L.; Westergren, B.; Vachenauer, P.: Springers mathematische Formeln. 3., durchg. Aufl., 1. korr. Nachdr. Aufl. Berlin u.a.: Springer 2003. ISBN: 3-540-67505-1.

Literatur

RATCHEV ET AL. 2008

Ratchev, S.; Turitto, M.: Micro- and Nanomanufacturing Strategic Research Agenda (2008). <<http://www.minamwebportal.eu/downloads/MINAMdocuments/2008-01-12%20-%20MINAM%20SRA%2012%2001%2008.pdf>> - 05.12.2010

REID ET AL. 1998

Reid, R. J.; Bright, V. M.; Butler, J. T.: Automated assembly of flip-up micromirrors. *Sensors and Actuators A: Physical* 1998 (1998) A66, S. 292–298.

REINHART ET AL. 2008A

Reinhart, G.; Heinz, M.; Kirchmeier, T.: Berührunglose Handhabungstechnologien für die Halbleiter- und Mikrosystemtechnik. In: Zäh, M.; Hoffmann, H.; Reinhart, G.: *münchener kolloquium · Innovation für die Produktion, Tagungsband zum Münchener Kolloquium*. München: Herbert Utz Verlag 2008. ISBN 978-3-8316-0844-7, S. 1.1-1.11

REINHART ET AL. 2008B

Reinhart, G.; Reiter, A.: Telepräsenz manuell mikromontieren. *Mikroproduktion* (2008) 6, S. 17–19.

REINHART ET AL. 2009A

Reinhart, G.; Zeilinger, T.: Sensorerfassung verdeckter Funktionsflächen. *wt Werkstattstechnik online* (2009) 09/2009, S. 585–591.

REINHART ET AL. 2009B

Reinhart, G.; Zeilinger, T.; Kirchmeier, T.; Reiter, A.: Grenzen manueller Mikromontage - Wege für die Teil- und Vollautomatisierung. *bayern photonics newsletter* (2009) 03/2009, S. 1–12.

ROHWEDDER 2008

Rohwedder: *Mikrosystem-Montage mit der MicRohCell MRC*. 2008.

ROSENHAHN 2003

Rosenhahn, B.: *Pose estimation revisited*. Univ., Diss.--Kiel, 2003. Kiel: Inst. für Informatik u. Praktische Math. der Christian-Albrechts-Univ. 2003. (Bericht / Institut für Informatik und Praktische Mathematik 03,8).

RUCHA 2010

Rucha, J.: *Charakterisierung eines formschlüssigen Piezorotationsantriebs zur Anwendung als sensorloser Präzisionsantrieb (PAD)*. Univ. München, Diss., als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 2010. ISBN: 978-3-18-517008-9.

RUFFNER 2001

SCHUTZRECHT: Schweiz EP 0866238B1 (22.08.2001). Ruffner, A. Pr.: 98810245.5 20.03.1998 Ruffner, A.: Reduktionsgetriebe.

SANTOCHI ET AL. 1998

Santochi, M.; Dini, G.: *Sensor Technology in Assembly Systems*. In: CIRP (Hrsg.): *Annals of the CIRP* 1998, S. 503–524.

SCHARVOGEL 1989

Scharvogel, F.: *Grundlagen der Mikromontage*. REFA-Nachrichten (1989) 4, S. 5–8.

SCHEEL 2006

Scheel, W.: Methoden zur Zuverlässigkeitsqualifizierung neuer Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik. 1. Aufl., Templin: Detert 2006. ISBN: 3-934142-53-2.

SCHELLER 2001

Scheller, T.: Untersuchungen zu automatisierten Montageprozessen hybrider mikrooptischer Systeme: Prof. H. Wurmus. Technische Universität Ilmenau. Ilmenau (2001).

SCHILP 2007

Schilp, M.: Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage. Diss. Techn. Univ. München, 2006. München: Herbert Utz 2007. ISBN: 978-3-8316-0631-3.

SCHMUTZ 1996

Schmutz, W.: Magazin zur Fixierung von Kleinteilen. In: Institutszentrum der Fraunhofer Gesellschaft (Hrsg.): IPA-Seminar: Produktionstechnik für Mikrosysteme "ProMikro". Stuttgart-Vaihingen 1996.

SCHÖNEBURG ET AL. 1996

Schöneburg, E.; Heinzmann, F.; Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien. 1. Aufl., 2., unveränd. Nachdr. Aufl. Bonn: Addison-Wesley 1996. ISBN: 38931949327990.

SCHÖTTLER 2008

Schöttler, K.: Planung und Untersuchung automatisierter Mikromontageprozesse unter besonderer Berücksichtigung der Einflussgrößen. Techn. Univ., Diss.--Braunschweig, 2008. Essen: Vulkan-Verl. 2008. ISBN: 9783802786990.

SCHUENEMANN ET AL. 1997

Schuenemann, M.; Grimme, R.; Kaufmann, T.; Schwaab, G.; Bader, U.; Schaefer W.; Dorner, J.: Manufacturing Concepts and Development Trends in the Industrial Production of Microelectromechanical Systems. In: SPIE (Hrsg.): Microrobotics and Microsystem Fabrication 1997, S. 1–12.

SCHWABL 2006

Schwabl, F.: Statistische Mechanik. Dritte, aktualisierte Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006. ISBN: 978-3-540-31097-6.

SCHWEIZER ET AL. 1993

Schweizer, M.; Weisener, T.; Vögele, G.: Umgang mit atomar kleinen Strukturen: Mikrosysteme erfordern eine Revolution der Produktionstechnik. Technische Rundschau 1993 (1993) 34, S. 20–23.

SEEGRÄBER 1993

Seegräber, L.: Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter. Ehningen bei Böblingen: expert-Verl. 1993. ISBN: 3-8169-0943-4.

SEIDEL 2002

Seidel, H.: Safety relevant microsystems for automotive applications. Microsystem Technologies (2002), S. Vol. 7, No. 5/6 (2002),244-248.

Literatur

SELIGER ET AL. 2000

Seliger, G.; Stephan, J.; Lange, S.: Hydroadhesive gripping by using peltier effect. IMECE (Hrsg.): Proc. of International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Florida 2000, S. 3–8.

SHEN ET AL. 2003

Shen, Y.; Xi, N.; Jung Li, W.: Force-Guided Assembly of Micro Mirrors. In: IEEE (Hrsg.): Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, Nevada 2003, S. 2149–2154.

SIOS MESSTECHNIK GMBH 2010

SIOS Messtechnik GmbH: Produkte. <<http://www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE.HTM>> - 04.05.2010.

SLATTER ET AL. 2004

Slatter, R.; Koenen, H.: Leichte, spielfreie Getriebe und Antriebe für Produktionsmaschinen. In: VDE et al. (Hrsg.): Elektrisch-mechanische Antriebssysteme. Fulda 2004, S. 6.

SMITH 2003

Smith, J. H.: MOEMS and miniaturized systems III. Micromachining and Microfabrications Conference for MOEMS and Miniaturized Systems. Bellingham, Wash.: SPIE 2003. ISBN: 0819447838.

SMITH ET AL. 1998

Smith, K. B.; Zheng, Y. F.: Accuracy Analysis of Point Laser Triangulation Probes Using Simulation. Journal of Manufacturing Science and Engineering 120 (1998) 4, S. 736–746.

SPI ROBOT SYSTEME 2009

SPI Robot Systeme: Hochpräzisionssysteme. <http://www.spi-robot.de/d_prod_robotik_hochpreaz.htm> - 24.02.2010.

STREULE ET AL. 2004

Streule, W.; Lindemann, T.; Birkle, G.; Zengerle, R.; Koltay, P.: PipeJet: A Simple Disposable Dispenser for the Nano- and Microliter Range. Journal of the Association for Laboratory Automation (JALA) 9 (2004) 5, S. 300–306.

STUMPP ET AL. 2006

Stumpp, B.; Burisch, A.: Fabrik auf dem Schreibtisch. Antriebspraxis 02/2006 (2006), S. 52–54.

SYSMELEC 2009

Sysmelec: Sysmelec - Robots and Autoamtion SMB 1000. <<http://www.sysmelec.ch/files/download/pdf/SMB.pdf>> - 23.01.2011

SZE ET AL. 2007

Sze, S. M.; Ng, K. K.: Physics of semiconductor devices. 3. ed. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience 2007. ISBN: 978-0-471-14323-9.

TABATABAI ET AL. 1984

Tabatabai, A. J.; Mitchell, O. R.: Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery. In: IEEE (Hrsg.): Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1984, S. 188–201.

TAMADAZTE ET AL. 2009

Tamadazte, B.; Dembélé, S.; Piat, N.: A Multiscale Calibration of a Photo Videomicroscope for Visual Servo Control: Application to MEMS Micromanipulation and Microassembly. *Sensors & Transducers Journal* (2009) Vol. 5, S. 37–52.

TAN ET AL. 2005

Tan, Q.; Lee, Y. C.; Itoh, M.: Soldering Technology for Optoelectronic Packaging. In: Boudreau, R. A. et al. (Hrsg.): *Passive micro-optical alignment methods*. Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis CRC 2005, S. 149–187. ISBN: 9780824707064.

TERFORT ET AL. 1997

Terfort, A.; Bowden, N.; Whitesides, G. M.: Three-dimensional selfassembly of milliletrescale components. *Nature* (1997) 386, S. 162–164.

THEUWISSEN 1997

Theuwissen, A. J.: *Solid-state imaging with charge-coupled devices*. Reprint. with corrections. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 1997. ISBN: 978-0792334569. (Solid-state science and technology library 1).

THOBEN 1999

Thoben, R.: *Parallelroboter für die automatisierte Mikromontage*. Techn. Univ. Braunschweig, Diss., als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1999. ISBN: 3183758083.

TICHEM ET AL. 2003

Tichem, M.; Karpuschewski, B.; Sarro, P. M.: Self-Adjustment of Micro-mechatronic Systems. In: *CIRP (Hrsg.): Annals of the CIRP 2003*, S. 17–20.

TICHEM ET AL. 2004

Tichem, M.; Lang, D.; Karpuschewski, B.: A classification scheme for quantitative analysis of micro-grip principles. *Assembly Automation* 24 (2004) 1, S. 88–93.

TIEN ET AL. 1996

Tien, N. C.; Solgaard, O.; Kiang, M.-H.; Daneman, M.; Lau, K. Y.; Muller, R. S.: Surface-micromachined mirrors for laser-beam positioning. *Sensors and Actuators A: Physical* (1996), S. 76–80.

VAHRENKAMP 2002

Vahrenkamp, T.: *Produktions- und Charakterisierungssysteme für optoelektronische Bauelemente auf Basis einer modularen Plattform*. INNO Innovative Technik – Anwendungen aus Nordrhein-Westfalen 7 (2002) 23:

VAN BRUSSEL ET AL. 2000

van Brussel, H.; Peirs, J.; Reynaerts, D.; Delchambre, A.; Reinhart, G.; Roth, N.; Weck, M.; Zussman, E.: Assembly of microsystems. In: *CIRP (Hrsg.): Assembly of microsystems 2000*, S. 451–472.

VANDAELE ET AL. 2005

Vandaele, V.; Lambert, P.; Delchambre, A.: Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation. *Precision Engineering* 29 (2005) 4, S. 491–505.

VDE 2009

VDE: *VDE-Trendreport 2009 "Elektro- und Informationstechnik"*. Hannover: 2009.

Literatur

VDI 1990

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: Verband Deutscher Ingenieure 1990.

VDI/VDE 1964

Verein Deutscher Ingenieure.; Verband Deutscher Elektrotechniker.: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen - VDI-Richtlinien 3258 Bl. Düsseldorf: VDI-Verl 1964.

VOYLES ET AL. 2005

Voyles, R. M.; Hulst, S.: Micro/macro force-servoed gripper for precision photonics assembly and analysis. *Robotica* 23 (2005) 4, S. 401–408.

WALLE ET AL. 2007

Walle, B. L.; Gauthier, M.; Chaillet, N.: A Submerged Freeze Microgripper for Micromanipulations. In: IEEE (Hrsg.): *Robotics and Automation*. Rom 2007.

WANG ET AL. 2009

Wang, L.; Mills, J. K.; Cleghorn, W. L.: Robotic Manipulation of Adhesive Droplets for Applications in Microassembly. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 2009 IEEE Intl. Conference on Information and Automation 2009*, S. 1563–1567.

WECK ET AL. 2003

Weck, M.; Peschke, C.: Handhabung von Mikrobauteilen - Herausforderungen und Lösungen. In: Hesselbach, J. (Hrsg.): *Kolloquium Mikroproduktion*. Essen: Vulkan-Verl. 2003, S. 119–128. ISBN: 380278670x.

WEICKER 2007

Weicker, K.: *Evolutionäre Algorithmen*. 2., überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden: Teubner; B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2007. ISBN: 9783835102194.

WESTERMEIR 2005

Westermeir, F.: *Exaktes Messen mit Licht*. *Produktion* 47 (2005), S. 11.

WÖRN ET AL. 2001

Wörn, H.; Schmöckel, F.; Bürkle, A.: From decimeter to centimeter sized mobile microrobots: the development of the MINIMAN system. In: SPIE (Hrsg.): *Microrobotics and Microassembly III 2001*, S. 175–186.

WREGE 2007

Wrege, J.: *Elektrostatisch unterstützte Handhabungstechniken in der Mikromontage*. Techn. Univ., Diss.--Braunschweig, 2007. Essen: Vulkan-Verl. 2007. ISBN: 9783802786983.

XIE ET AL. 2003

Xie, H.; Pan, Y.; Fedder, G. K.: Endoscopic optical coherence tomographic imaging with a CMOS-MEMS micromirror. *Sensors and Actuators A: Physical* (2003) 103, S. 237–241.

YAMAHA 2009

Yamaha: Basic specifications YK250-400XC. <<http://www.yamaharobotics.com/Business/robot/ykx/ykxc/yk250-400xc/images/catalog.pdf>> - 26.01.2010.

YANG ET AL. 2005

Yang, G.; Gaines, J. A.; Nelson, B. J.: Optomechatronic Design of Microassembly Systems for Manufacturing Hybrid Microsystems. IEEE 4/August/2005 (2005) 52, S. 1013–1023.

YEH ET AL. 1996

Yeh, R.; Kruglick, E. J.; Pister, K. S.: Surface-Micromachined Components for Articulated Microrobots. Journal of microelectromechanical systems 5 (1996) 1, S. 10–17.

YESIN 2005

Yesin, K. B.: A CAD model based tracking system for visually guided microassembly. Robotica Vol. 23, No. 4 (2005), S. 409-418.

ZARSCHIZKY ET AL. 2003

Zarschizky, H.; Richter, A.: Mit Terabit pro Sekunde durch photonische Netze. Physik Journal 2/2003 (2003) 4, S. 33–39.

ZESCH 1997

Zesch, W.: Multi-degree-of-freedom micropositioning using stepping principles. Eidgen. Techn. Hochsch. Zürich, Diss., Nr. 12318, 1997. Ref.: G. Schweitzer ; Korref.: R. Y. Siegwart. Zurich: 1997.

ZESCH ET AL. 1998

Zesch, W.; Fearing, R. S.: Alignment of Microparts Using Force Controlled Pushing. In: SPIE (Hrsg.): Microrobotics and Micromanipulation. Boston 1998, S. 148–156.

ZÖPPIG 1998

Zöppig, V.: Untersuchungen zur Entwicklung von Miniaturgreifern für die industrielle Mikromontage. Techn. Univ. Ilmenau, Diss., Ilmenau: ISLE 1998. ISBN: 393263327x.