



KfK 5393  
September 1994

# **Rechnergestützte Vermessung von dreidimensionalen Mikrostrukturen**

K.-U. Stucky  
Institut für Angewandte Informatik

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**

**Institut für Angewandte Informatik**

**KfK 5393**

**Rechnergestützte Vermessung von dreidimensionalen  
Mikrostrukturen\*)**

**Karl-Uwe Stucky**

**\*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe  
genehmigte Dissertation**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe**

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0303-4003

# Rechnergestützte Vermessung von dreidimensionalen Mikrostrukturen

## Zusammenfassung

Mit dem im Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelten LIGA-Verfahren lassen sich Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und beliebiger lateraler Strukturgeometrie herstellen. Erweiterungen des LIGA-Prozesses erlauben auch eine Strukturierung in drei Dimensionen, z.B. Stufen und konische Strukturen. Ferner existiert eine Reihe weiterer Verfahren zur Strukturierung dreidimensionaler Körper, von denen der Silizium-Mikromechanik die größte Bedeutung zukommt. Der Einsatz mikromechanischer Strukturen in der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Sensor- und Aktorkomponenten verlangt danach, die Möglichkeiten zur dreidimensionalen Strukturierung durch neue Entwicklungen und die Kombination bisheriger Prozesse zu erweitern.

Neben der Bestimmung zweidimensionaler geometrischer Parameter zur Vermessung der ebenen Oberflächengeometrie mikromechanischer Strukturen sind auch in zunehmendem Maße Methoden zur dreidimensionalen Vermessung gefragt. Im Hinblick auf die bereits beginnende industrielle Fertigung ist das Fernziel ein vollautomatisches System zur Kontrolle geometrischer Parameter. Dabei soll die Strukturgeometrie mit Hilfe der digitalen Bildanalyse aus geeigneten mikroskopischen Aufnahmen rekonstruiert werden. Optische Verfahren kommen dabei, hauptsächlich wegen geringer Schärfentiefe, nicht in Betracht. Die Rasterelektronenmikroskopie wird daher als bildgebendes Verfahren ausgewählt. Die Bestimmung der Geometrieparameter kann über photogrammetrische Berechnungen anhand von Stereoaufnahmen erfolgen.

Auf dieser Grundlage wird in der vorliegenden Arbeit ein Vermessungssystem konzipiert, mit dem sich durch schrittweise Erweiterung unterschiedliche Vermessungsaufgaben bei unterschiedlichen Strukturgeometrien durchführen lassen. Es hat sich gezeigt, daß neben der Mustererkennung durch die digitale Bildanalyse und der Steuerung des Mikroskops auch eine automatische Meßablaufsplanung erforderlich ist. Dabei werden die Parameter für Mikroskop und Probentisch zur Aufnahme von Stereobildern berechnet. Wichtigste Kriterien für diese Parameter sind Verdeckungsfreiheit für alle für die Erfüllung einer Meßaufgabe relevanten Strukturteile sowie die erreichbare Meßgenauigkeit. Ohne diese Meßablaufsplanung können stereophotogrammetrische Vermessungen nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt werden.

Für die Mikroskopsteuerung ist eine eigene Systemkomponente vorgesehen. Durch diese Trennung vom eigentlichen Vermessungssystem ist ein Einsatz des Systems bei unterschiedlichen Gerätekonfigurationen möglich. Für die automatische Durchführung der Objekterkennung sind umfangreiche Entwicklungsarbeiten notwendig. Diese Aufgaben sind in das Konzept so eingebunden, daß sie zunächst interaktiv durch den Benutzer erledigt werden können.

Die automatische Meßablaufsplanung ist als Systemkomponente Vorbereitung für polyedrische Strukturen realisiert. Durch eine objektorientierte Repräsentation der Strukturgeometrie und von Vermessungsaufgaben auf der Basis entsprechender Modelle ist die Erweiterungsfähigkeit des Systems gegeben. Es besteht die Möglichkeit der Visualisierung der Ergebnisse der Vorbereitung. Ferner kann die Durchführung von Vermessungen an synthetischen Bildern simuliert werden. Auf der Grundlage der Vorbereitungsresultate sind bereits einfache Vermessungsaufgaben an realen LIGA-Strukturen durchgeführt worden.

# Computer-aided Measurement of Three-dimensional Microstructures

## Abstract

By application of the LIGA technique developed at the Karlsruhe Nuclear Research Center microstructures can be manufactured with high aspect ratios and any lateral shape. In additional process steps patterning in three dimensions is possible, e.g. steps and conical structures can be made. Moreover, a number of further techniques are available for patterning three-dimensional structures, the most important of them being silicon-based micromechanics. The application of micromechanical structures in microsystems engineering for manufacturing sensor and actuator components calls for an extension of the means of three-dimensional patterning by novel developments and by combination of existing processes.

Besides for methods of determination of two-dimensional geometric parameters used to measure the plane surface geometries of micromechanical structures, there is a growing demand for methods to be used in three-dimensional measurement. Considering industrial-scale manufacture which has already started recently, the long-term goal consists in a fully automated system of geometric parameter control. It is envisaged to reconstruct the geometry by means of digital image analysis from suitable microscopic pictures. Optical techniques are not eligible, mainly because of the small depth of focus. Therefore, scanning electron microscopy is chosen as the imaging technique. The geometric parameters can be determined by photogrammetric calculations based on stereo pictures.

Starting from this basis, a system of measurement is conceived here which allows various types of measurement tasks to be performed for different geometries of the structures through stepwise extension. It has appeared that besides pattern recognition by digital image analysis and microscope control also automated planning of measurement sequences will be necessary. For this, the parameters for the microscope and for the specimen table used to take stereo pictures are calculated. The most important criteria which determines these parameters are the visibility of all structural parts relevant to compliance with a measurement task and the accuracy of measurement achievable. Without planning of the sequences of measurement, stereo photogrammetric measurements can be made to a limited extent only.

It is envisaged to provide a separate system component for microscope control. As it is separated from the measurement system proper, the system can be applied to different equipment configurations. Extensive development work is necessary for automated object recognition. These tasks have been integrated into the concept in such a manner that in the present version of the system they can be handled by the user in an interactive mode.

Automated planning of the measurement sequences has already been implemented as configuration system component for polyhedral structures. By object-oriented representation of the structure geometry and of measurement tasks on the basis of suitable models the system lends itself to expansion. It is possible to visualize the results of the configuration. Besides, the measurements can be simulated on synthetic images. Based on the result of the configuration, simple measurement tasks have been performed on real LIGA structures.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Mikrotechnik und Qualitätssicherung .....	1
1.2	Verfahren zur Mikrostrukturierung .....	2
1.3	Zweidimensionale Vermessung - Stand der Technik .....	4
1.4	Dreidimensionale Vermessung - Motivation und Zielsetzung .....	5
<b>2</b>	<b>Grundlagen für ein 3D-Vermessungssystem .....</b>	<b>9</b>
2.1	Wahl eines Meßverfahrens .....	9
2.2	Stereophotogrammetrie .....	26
2.3	Digitale Bildanalyse .....	29
2.4	Zusammenfassung .....	32
<b>3</b>	<b>Systemkonzeption .....</b>	<b>35</b>
3.1	Leistungsumfang des Vermessungssystems .....	35
3.2	Architektur des Gesamtsystems .....	37
3.3	Geometriemodell.....	39
3.4	Meßaufträge .....	50
3.5	Probenparameter und REM-Beschreibung .....	53
3.6	Vorbereitung .....	54
3.7	Vermessung .....	65
3.8	REM-Steuerung .....	69
3.9	Auswertung .....	70
<b>4</b>	<b>Objektorientierte Repräsentation .....</b>	<b>73</b>
4.1	Begriffsdefinitionen .....	73
4.2	Anwendung beim 3D-Vermessungssystem .....	74
4.3	Vorteile der objektorientierten Programmierung .....	78
<b>5</b>	<b>Implementierung .....</b>	<b>81</b>
5.1	Programmiersprache und verwendete Software .....	81
5.2	Umfang der bisher implementierten Software .....	81
5.3	Algorithmen.....	84
5.4	Anwendungsbeispiele .....	94
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Ausblick .....</b>	<b>101</b>
	Anhang .....	105
	Literatur .....	115

# 1 Einleitung

## 1.1 Mikrotechnik und Qualitätssicherung

Die Mikroelektronik hat in den vergangenen Jahrzehnten in einer beispiellos raschen und immer noch anhaltenden Entwicklung fast alle Lebensbereiche des Menschen beeinflusst. Die digitale Datenverarbeitung, Kommunikationstechnologien, Meß- und Regelungstechnik sind nur einige Beispiele technischer Bereiche, die hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von dieser Entwicklung profitieren. Neue parallele Entwicklungs- und Fertigungsmethoden sind dafür verantwortlich, daß mikroelektronische Produkte immer kleiner und leistungsfähiger werden und daß gleichzeitig die leistungsbezogenen Kosten für ihre Herstellung rapide sinken.

Ein weiterer bedeutender Faktor, der den Erfolg der Mikroelektronik mitbegründet, sind Qualitätssicherungskonzepte, die von der Elektronikindustrie parallel zu den Fertigungsmethoden entwickelt und im Laufe der Zeit immer weiter perfektioniert wurden, um mit der fortschreitenden Miniaturisierung mithalten zu können. Hier sind im wesentlichen vollautomatische Systeme zur Maskeninspektion zu nennen sowie elektrische Funktionstests [1][2].

Am Vorbild der Mikroelektronik orientieren sich weitere Mikrotechniken wie die Mikrooptik und die Mikromechanik. Unter der Bezeichnung Mikrosystemtechnik ist hier ein neues Arbeitsgebiet entstanden, mit dem Ziel, mikroelektronische, mikromechanische und mikrooptische Komponenten zu integrieren und so miniaturisierte Systeme mit Sensoren und Aktoren für unterschiedlichste technische und medizinische Anwendungen zu bauen. Insbesondere auf dem Gebiet der Mikrostrukturierungstechniken zeigen die Erfolge der vergangenen Jahre, daß hier mit einer ähnlich raschen Entwicklung wie in der Mikroelektronik zu rechnen ist. Und genau wie dort ist bei industriellen Anwendungen eine produktionsbegleitende, automatisierte Qualitätssicherung erforderlich. Im Gegensatz zu mikroelektronischen Komponenten ist bei mikromechanischen Komponenten deren Funktionalität im wesentlichen von der Strukturgeometrie abhängig, so daß hier bei den Strukturabmessungen letztendlich eine strenge Maßhaltigkeit gewährleistet werden muß. Daneben sind auch qualitative Prüfungen von Strukturflächen und -kanten durchzuführen. Die Qualitätssicherung in der Mikromechanik erfordert also spezielle Strukturvermessungssysteme, die wegen der mikroskopisch kleinen Strukturen im Gegensatz zu Vermessungen im makroskopischen Bereich völlig neue Anforderungen stellen. Solche Systeme werden jedoch nicht erst im Zusammenhang mit der industriellen Massenfertigung interessant. Auch während der Entwicklung von Herstellungsverfahren besteht Bedarf, die Maße von erzeugten Teststrukturen zu bestimmen und auch qualitative Prüfungen durchzuführen, wobei hier die Anforderungen an den Grad der Automatisierung eines Systems niedriger sind als in der Industrie.

Bei mikromechanischen Strukturen handelt es sich um dreidimensionale Körper, so daß hier letztlich auch eine Vermessung in drei Dimensionen gefordert werden muß. Bevor auf die Notwendigkeit zur Entwicklung eines 3D-Vermessungssystems näher eingegangen wird, werden die wichtigsten Verfahren zur Mikrostrukturierung kurz beschrieben und der Stand der Technik bei der Vermessung zweidimensionaler geometrischer Eigenschaften von Mikrostrukturen vorgestellt.



## 1.2 Verfahren zur Mikrostrukturierung

### LIGA-Verfahren

Das LIGA-Verfahren wurde am Institut für Mikrostrukturtechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe entwickelt, um sehr kleine Trenndüsen für die Anreicherung von Uran 235 herzustellen [3]. Diese Technik wurde in den letzten Jahren zu einem der bedeutendsten Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen ausgebaut [4][5][6].

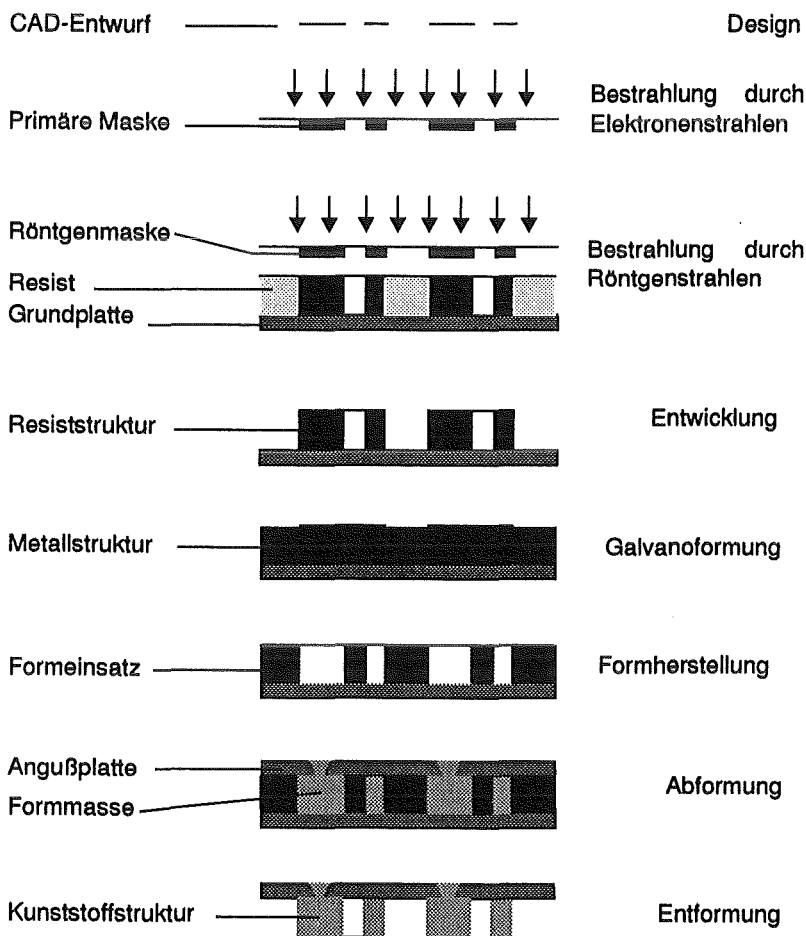


Abb. 1  
Schematische Darstellung der Grundzüge des LIGA-Verfahrens:  
Ausgehend von einem zweidimensionalen CAD-Entwurf wird durch Röntgenlithographie eine dreidimensionale Resiststruktur erzeugt. Durch Galvanoformung erhält man eine dazu komplementäre Metallstruktur, die als Werkzeug dient, um durch weitere Abformungsschritte Kunststoffstrukturen herzustellen.

Der Name LIGA steht für Röntgentiefenlithographie, Galvanik und Abformung, den drei wesentlichsten Prozessschritten des Verfahrens (Abb. 1). Das zweidimensionale Muster einer Maske wird mittels paralleler, energiereicher Synchrotronstrahlung in eine bis zu mehrere 100 Mikrometer dicke Resistschicht (üblicherweise PMMA (Polymethylmethacrylat)) übertragen. Bei der Entwicklung des Resists werden die belichteten Teile herausgelöst und es bleiben einzelne Blöcke stehen, die lateral die von der Maske vorgegebene Struktur aufweisen und senkrechte Wände haben. Der Resist befindet sich auf einer leitenden Grundplatte. Im folgenden Prozessschritt werden die Lücken galvanisch mit Metall aufgefüllt. Nach Entfernen des Resists liegt eine zur Resiststruktur komplementäre Metallstruktur vor, die als Werkzeug dienen kann, um durch Abformungstechniken Kunststoffstrukturen in größeren Stückzahlen zu fertigen.

Durch weitere Galvanikschritte ist auch die Massenfertigung von metallischen Strukturen möglich. Opferschichttechniken und das Zusammensetzen einzelner Strukturen mit Hilfe von Mikro-Montagetechniken ermöglichen die Herstellung beweglicher Strukturen [7][8]. Mittlerweile werden auch gestufte Strukturen und Strukturen mit schrägen Wänden hergestellt [9].

Die wichtigsten Vorteile des LIGA-Verfahrens sind die großen Strukturhöhen, hohe Aspektverhältnisse (Verhältnis der Strukturhöhe zu den minimalen lateralen Abmessungen), eine beliebige Formgebung im lateralen Querschnitt, eine große Materialpalette und die Möglichkeit zur Massenfertigung.

Es gibt eine Fülle von Anwendungsbeispielen, von denen hier exemplarisch einige wichtige genannt seien [10]:

- Starre metallische Strukturen (Optische und mechanische Filter [11], Mikrosteckverbindungen)
- Strukturen für optische Anwendungen aus PMMA (Zylinderlinsen, Prismen, optische Strahlteiler, Mikrosspektrometer [12])
- Beschleunigungssensor, Mikromotoren und -turbinen als Beispiele für bewegliche Mikrostrukturen [13][14]

### Silizium-Mikromechanik

Die Silizium-Mikromechanik bildet neben der LIGA-Technik einen weiteren bedeutsamen Ansatz zur Mikrostrukturierung [6][15][16]. Dabei können zwei grundsätzliche Techniken unterschieden werden: Anisotropes Ätzen und Oberflächenmikromechanik (OMM).

Beim anisotropen Ätzen wirken Ätzlösungen auf einen Silizium-Einkristall ein, die das Material senkrecht zur (100)-Kristallebene mit sehr viel höherer Rate abtragen als senkrecht zur (111)-Ebene. Die (111)-Ebene bildet dann praktisch eine Ätzstoppschicht, durch die der Ätzvorgang in eine bestimmte Richtung gelenkt wird. Dadurch ist es möglich, V-förmige Gruben mit rechtwinkligem Querschnitt und nicht-rechtwinklige Strukturen mit senkrechten Wänden herzustellen. Mit besonderen Techniken können auch entsprechende Erhebungen aus einem Einkristall herausgeätzt oder auch Gruben mit ebenem Boden erzeugt werden. Die Besonderheiten beim anisotropen Ätzen von Silizium sind die Erzeugung von schrägen Wänden, wobei der Winkel der Wände zur Kristalloberfläche durch die Ausrichtung der (111)-Ebene festgelegt ist, und die Herstellung von Membranen, freischwebenden Zungen und Brücken durch Unterätzen.

In der Oberflächenmikromechanik werden Schichten auf die Oberfläche einer Silizium-Scheibe aufgebracht und photolithographisch oder durch Ätzen strukturiert. Eine besondere Rolle spielen hier auch Opferschichttechniken zur Erzeugung freitragender und beweglicher Strukturen. Charakteristisch ist hier eine vergleichsweise geringe Strukturhöhe von wenigen Mikrometern.

Derzeitige Anwendungen finden sich sowohl bei der Sensorherstellung (Druck, Beschleunigung) als auch bei der Aktorherstellung (Mikromotoren, Linearantriebe).

Durch Kombination von anisotropem Ätzen mit der Oberflächenmikromechanik läßt sich die Formenvielfalt vergrößern. Ein Vorteil der Siliziumtechnik im Hinblick auf die Entwicklung von Mikrosystemen ist die Integration von elektronischen und mechanischen Systemkomponenten auf einem Chip.

## Andere Verfahren

Hier sind Verfahren zu nennen, bei denen Oberflächen mit profilierten Mikrowerkzeugen strukturiert werden (mechanische Mikrofertigung) [17], die optische Lithographie [18] sowie Dickschichttechniken, bei denen Siebdruckverfahren zum Einsatz kommen. Die Bedeutung dieser Verfahren ist im Vergleich mit der LIGA-Technik und der Silizium-Technik geringer. Sie bilden jedoch wertvolle Ergänzungen und geben vor allem Hinweise darauf, daß einerseits die zukünftige Mikrostrukturtechnik nicht völlig von einem Verfahren beherrscht wird und daß andererseits mit Neu- und Weiterentwicklungen zu rechnen ist, welche die Vielfalt an Formen und Funktionalität mikromechanischer Strukturen vergrößern.

### 1.3 Zweidimensionale Vermessung - Stand der Technik

Strukturen, die in der Mikroelektronik gefertigt werden, können als zweidimensionale Strukturen betrachtet werden, da ihre Höhe gegenüber den lateralen Abmessungen vernachlässigt werden kann. In der Mikrostrukturtechnik treten zweidimensionale geometrische Strukturen beim LIGA-Verfahren bei allen Herstellungsschritten auf. Dabei können Masken noch als rein zweidimensionale Objekte angesehen werden, während die dreidimensionalen Strukturen (Resist-, Metall- und Kunststoffstrukturen) ebene (2D) Strukturoberflächen parallel zur Substratgrundfläche aufweisen. Aus dieser Eigenschaft ergab sich die Notwendigkeit zur Entwicklung des zweidimensionalen Vermessungssystems COSMOS-2D (Computer System for Measurement of Optically acquired Structure Surfaces in 2 Dimensions) [19][20][21].

COSMOS-2D ist ein vollautomatisches Vermessungssystem, das in der Lage ist, zweidimensionale Strukturen beliebiger Geometrie mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung und Mustererkennung zu vermessen, d.h. es ermittelt geometrische Parameter der Strukturen. So werden etwa Distanzen zwischen beliebigen Punkten auf den Strukturkanten, Standardabweichungen von Kanten und Radien von Kreisen bestimmt. Das System kann auch dahingehend erweitert werden, daß die Flächeninhalte ebener Oberflächen gemessen werden können.

Die ebenen Oberflächen von LIGA-Strukturen können in einem Lichtmikroskop abgebildet werden, da alle Kanten der Strukturflächen gleichzeitig im Fokusbereich des Mikroskops liegen. Geometrische Primitive, ähnlich den beim CAD-Entwurf der Mikrostrukturen erzeugten, werden in einem Bildvorverarbeitungsschritt aus den digitalisierten Mikroskopbildern extrahiert. In einem nachfolgenden Mustererkennungsschritt werden diejenigen Ecken und Kanten verifiziert, die für die Vermessung relevant sind [22]. Eine exakte Positionierung, wie sie bei anderen vollautomatischen Inspektionssystemen, die mit Matchingverfahren arbeiten und lediglich das Vorhandensein bestimmter Muster überprüfen, notwendig ist, muß bei COSMOS-2D nicht durchgeführt werden.

Meßaufträge für das System werden beim CAD-Entwurf durch die Bemaßung erzeugt. Die vorliegenden CAD-Daten werden in einem Zwischenschritt für die Vermessung aufbereitet. Dabei werden Steuerungsbefehle für Mikroskop und Probentisch hinzugefügt und zusammen mit den Solldaten und den Befehlen für Vermessung und Mustererkennung dem Vermessungssystem übergeben.

COSMOS-2D wurde von Anfang an für den Einsatz in der Qualitätskontrolle bei industrieller Fertigung konzipiert und optimiert. Da bei Tausenden von Einzelstrukturen auf einem Substrat

an eine Komplettvermessung sämtlicher Strukturen innerhalb einer Fertigungslinie aus Zeitgründen nicht zu denken ist, wurde hier die Methode des Parametrischen Optischen Testens vorgeschlagen, bei der Teststrukturen (sog. *Pams*) stellvertretend für die Strukturen eines Substrats vermessen werden [23]. Die *Pams* sind so zu entwerfen, daß sie mindestens die gleichen kritischen Bereiche wie die anderen Strukturen aufweisen.

#### 1.4 Dreidimensionale Vermessung - Motivation und Zielsetzung

Bei vielen Anwendungsbeispielen gerade bei einfachen LIGA-Strukturen, wie z.B. bei optischen Filtern, ist die Funktionalität der Mikrostruktur im wesentlichen nur von der lateralen Geometrie abhängig. In diesen Fällen können je nach Anforderungen in der Qualitätssicherung COSMOS-2D für Vermessungen oder auch einfache Matchingverfahren wie in der Mikroelektronik erfolgreich eingesetzt werden. Mikromechanische Strukturen weisen nun im Vergleich zu ihren lateralen Abmessungen eine sehr große Strukturhöhe auf, wobei beim LIGA-Verfahren sogar Aspektverhältnisse von mehr als 100 erzielt werden können [6]. Solche Mikrostrukturen sind damit dreidimensionale Körper. Bei den hier vorgestellten Verfahren erfolgt allerdings eine Strukturierung in der dritten Dimension nur in begrenztem Umfang. Einfache LIGA-Strukturen sind hier noch völlig unstrukturiert, bei der Silizium-Technik sind die Möglichkeiten zur Strukturierung an die Ausrichtung des Kristalls und die Lage der (111)-Ebene gebunden. Obwohl die Funktionalität dieser Strukturen auch von ihrer dreidimensionalen Geometrie abhängt, bestand bisher wenig Bedarf für eine dreidimensionale Vermessung. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß in Zukunft durch Weiterentwicklung bestehender Verfahren, durch die Kombination bisheriger Techniken und auch durch neu entwickelte Verfahren die Möglichkeiten zur dreidimensionalen Strukturierung immer weiter ausgedehnt werden. Opferschichttechniken, schräge und gestufte LIGA-Strukturen und das Unterätzen von Strukturteilen in der Siliziumtechnik sind Beispiele für die Bemühungen in der Mikrostrukturtechnik, mikromechanische Körper in drei Dimensionen zu strukturieren. Insbesondere der Wunsch, mikromechanische Aktoren herzustellen, verlangt danach, die Möglichkeiten der dreidimensionalen Formgebung, wie sie in der makroskopischen Mechanik und im Maschinenbau gegeben sind, nach und nach auch für die kleinen und kleinsten Abmessungen in der Mikromechanik zu schaffen. In diesem Zusammenhang ist auch auf die Bedeutung von Mikro-Montagetechniken zum Aufbau komplexer geometrischer Strukturen aus einfacheren Bauteilen hinzuweisen.

In dem Maße, in dem Mikrostrukturierungstechniken weiterentwickelt werden, werden sowohl bei der Prozeßentwicklung als auch in der bereits heute beginnenden industriellen Fertigung Vermessungssysteme gefragt sein. Wegen der vielen Prozeßschritte und der Forderung nach einer raschen und zuverlässigen Qualitätskontrolle kann auf rechnergestützte Verfahren nicht verzichtet werden [24]. Angesichts der Komplexität der dreidimensionalen Welt und der Kleinheit der Mikrostrukturen ist der Entwicklungsaufwand für ein 3D-Vermessungssystem enorm. Daher ist es um so mehr erforderlich, diese Aufgaben so früh wie möglich in Angriff zu nehmen, um mit der Entwicklung der Mikrostrukturtechnik Schritt zu halten und bei zukünftigen konkreten Anforderungen bereits erste Konzepte und Realisierungen zur Verfügung stellen zu können.

Für die Entwicklung eines 3D-Vermessungssystems ist es nicht gerechtfertigt, sich auf die derzeit bestehenden Strukturierungsmöglichkeiten und sich daraus ergebende Vermessungswün-

sche oder gar nur auf einen Teil davon zu beschränken. Besteht beispielsweise die Aufgabe darin, bei LIGA-Strukturen die Strukturhöhe zu messen, könnte hier eine Realisierung mit automatischer Fokussierung in einem Lichtmikroskop angestrebt werden. Als erster Schritt in Richtung 3D ist ein solcher Ansatz jedoch in zweifacher Hinsicht unakzeptabel. Erstens kann hier eigentlich nur von einer eindimensionalen Vermessung gesprochen werden, da es sich um die Messung einer Strecke in einer Richtung (senkrecht zur Substratebene) handelt. Zum zweiten bietet diese Vorgehensweise trotz hohen Entwicklungsaufwands letztendlich nur die Lösung für eine ganz spezielle Aufgabe. Aus dreidimensionaler Sicht muß der geäußerte Vermessungswunsch erweitert werden auf die allgemeine Aufgabe, Distanzen in beliebiger Richtung im dreidimensionalen Raum zu messen. Erst dann kann, für diese eine Vermessungsaufgabe, von einer **3D-Vermessung** gesprochen werden. Ein **3D-Vermessungssystem** soll sich nun aber nicht nur allein auf eine einzige Aufgabe beziehen. Schon eine Distanzmessung kann nur im Zusammenhang mit der Strukturgeometrie als Vermessungsaufgabe gestellt werden. Wie oben ausgeführt wurde, können bereits nach dem heutigen Stand der Technik vielfältige geometrische Formen hergestellt werden. Ein Vermessungssystem, und sei es nur für die Aufgabe der Distanzmessung, benötigt daher eine geometrische Modellierung der Mikrostrukturen. Ist dann aber erst einmal ein Geometriemodell vorhanden, ergeben sich schnell neue Vermessungswünsche für weitere dreidimensionale geometrische Parameter der vorhandenen Geometrieformen (z.B. Radien von Kreisen, Winkel zwischen geraden Strukturkanten und Ebenen) und auch für qualitative Prüfungen (z.B. Löcher in Strukturflächen suchen). Dabei ist zu beachten, daß die betrachteten Strukturteile eine beliebige Lage im Raum einnehmen können.

Die Entwicklung eines 3D-Vermessungssystems für Mikrostrukturen sollte daher weder an speziellen Vermessungswünschen noch an bestimmten geometrischen Eigenschaften der Strukturen (wie z.B. senkrechten Strukturwänden) orientiert werden. Vielmehr ist ein allgemeinerer Ansatz zu wählen, der von einer entsprechend allgemeinen Definition der Begriffe Vermessungsaufgabe und 3D-Geometrieform ausgeht. Das System ist so zu konzipieren, daß es beginnend mit einfachen Aufgaben und Situationen nach und nach auch auf komplexere Fälle erweitert werden kann.

Bevor eine solche Konzeption erstellt wird, muß die Frage geklärt werden, wie das System vermessungstechnisch realisiert werden kann. Die Bestimmung geometrischer Parameter von Mikrostrukturen setzt die Erkennung der zu vermessenden Strukturen bzw. der für die Vermessung relevanten Strukturteile voraus. Es wird ein Bildaufnahmeverfahren benötigt, um die Mikrostrukturen abzubilden. Soll das System automatisiert werden, sind Methoden der digitalen Bildanalyse einzusetzen, um eine Objekterkennung durchzuführen. Aus den aufgenommenen Bildern müssen Informationen über die Position von Objektpunkten sowie Position und Orientierung ausgedehnter Objektteile gewonnen werden können. Bildaufnahmeverfahren, Objekterkennung und die Methode, mit der 3D-Informationen aus den Bildern extrahiert werden, bilden zusammen das dem Vermessungssystem zugrundeliegende Meßverfahren.

Fernziel ist die Entwicklung eines Vermessungssystems, das in der Lage ist, vollautomatisch die geometrischen Parameter von Mikrostrukturen zu vermessen. Der Blick richtet sich hier auf die zukünftige industrielle Fertigung mikromechanischer Bauteile und die damit verbundene Qualitätssicherung. Auch im 3D-Fall besteht die Möglichkeit, Teststrukturen stellvertretend für die eigentlichen Produkte zu vermessen, wie es bereits für das System COSMOS-2D vorgeschlagen wurde. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein erheblicher Entwicklungsaufwand nötig. Dabei sind drei Aufgabenbereiche zu unterscheiden:

1. Automatische Planung des Vermessungsablaufs für unterschiedliche Vermessungsaufgaben und unterschiedliche Strukturgeometrien im Rahmen eines einzigen Grundsystems.
2. Vollautomatische Steuerung des Bildaufnahmesystems.
3. Automatische Durchführung der Objekterkennung in den vom Bildaufnahmesystem gelieferten Bildern.

In der vorliegenden Arbeit wird die konzeptionelle Grundlage für ein 3D-Vermessungssystem erstellt. Von den oben genannten drei Aufgabenbereichen steht die Automatische Meßablaufsplanung im Vordergrund, da diese bereits dann benötigt wird, wenn ein interaktives Vermessungssystem realisiert werden soll, bei dem der Benutzer Steuerungsaufgaben und Objekterkennungsaufgaben übernimmt. Die Arbeit verfolgt konkret folgende Ziele:

- Auswahl eines geeigneten Bildaufnahmeverfahrens und einer Meßmethode.
- Erstellen von Modellen zur Beschreibung der Strukturgeometrie und von Vermessungsaufgaben.
- Konzeption des Grundsystems. Die beiden Aufgabenbereiche Objekterkennung und Steuerung des Bildaufnahmesystems werden in diese Konzeption so eingebunden, daß sie zunächst interaktiv durch den Benutzer erledigt und später sukzessive im Rahmen weiterer Entwicklungsarbeiten automatisiert werden können.
- Sicherstellen der Erweiterungsfähigkeit hinsichtlich Vermessungsaufgaben und Geometrieformen.
- Realisierung einer ersten Version der automatischen Meßablaufsplanung als Grundlage für die Realisierung eines interaktiven Vermessungssystems.

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert:

Kapitel 2 befaßt sich mit der Auswahl eines für das geplante Vermessungssystem geeigneten Meßverfahrens. Unterschiedliche optische Mikroskopverfahren, Nahfeldmikroskopien, die akustische Mikroskopie und die Elektronenmikroskopie werden hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit als Bildaufnahmesystem nach einem Anforderungskatalog bewertet. Die Rasterelektronenmikroskopie wird dabei ausführlicher beschrieben, da sie als geeignetstes Bildaufnahmeverfahren die Grundlage für das Vermessungssystem bildet. Ferner wird die Methode der Stereophotogrammetrie als Methode zur Bestimmung von 3D-Positionen aus zweidimensionalen REM-Aufnahmen diskutiert. Abschließend wird die Rolle der digitalen Bildanalyse für die Muster- und Objekterkennung in einem automatischen System erläutert.

Kapitel 3 beschreibt die Systemkonzeption. Ausgangspunkt bildet ein grober Überblick über die Systemarchitektur. Im folgenden werden dann Begriffe eingeführt, mit denen die Strukturgeometrie und Vermessungsaufgaben für das System beschrieben werden. Bereits hier liegt die besondere Betonung auf der Erweiterungsfähigkeit des Systems. Die weiteren Teile des Kapitels beschreiben die einzelnen Systemkomponenten. Das Hauptgewicht liegt auf der Komponente zur automatischen Meßablaufsplanung, die bei weitem die höchste Komplexität aufweist, während die anderen Komponenten konzeptionell wesentlich einfacher zu beschreiben sind. Es werden mehrere Gründe angegeben, die dafür sprechen, die Planung für den Ablauf der photogrammetrischen Vermessung in REM-Aufnahmen vollständig zu automatisieren. Die Erweiterungsfähigkeit des Systems hinsichtlich Geometrieformen und Vermessungsaufgaben

wird durch objektorientierte Methoden bei Entwurf und Programmierung der Systemsoftware wesentlich unterstützt. Kapitel 4 beschreibt den objektorientierten Ansatz und anhand von Beispielen die Vorteile dieser Vorgehensweise.

In Kapitel 5 werden Einzelheiten der bisher erstellten Software vorgestellt. Dabei werden die grundlegendsten Algorithmen des Systems beschrieben. Einige Beispiele verdeutlichen die Funktionalität der automatischen Meßablaufsplanung sowie erste Vermessungsergebnisse für verschiedene Vermessungsaufgaben an synthetischen Bildern und an REM-Aufnahmen realer Mikrostrukturen. Abschließend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefaßt und Ausblicke auf zukünftige Arbeiten gegeben, die zur Realisierung eines 3D-Vermessungssystems auf den hier erarbeiteten Grundlagen notwendig sind.

## 2 Grundlagen für ein 3D-Vermessungssystem

Am Beginn der Entwicklung eines Vermessungssystems steht die Auswahl einer geeigneten physikalischen Methode zur Meßwerterfassung [25]. Im Falle der Vermessung von dreidimensionalen Objekten sollen die erfaßten Daten in Form digitaler Bilder vorliegen. Eine Abbildung der zu vermessenden Objekte ist erforderlich, weil zur Erfüllung der eigentlichen Aufgabe, nämlich der Bestimmung geometrischer Parameter, die Erkennung von geometrischen Merkmalen in einer komplexen Szene eine notwendig Voraussetzung für die Durchführung weiterer Berechnungen ist. Es wurden eine Reihe von Verfahren aus den Gebieten Optik, Akustik und Elektronenoptik untersucht und anhand eines Katalogs von Anforderungen hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit bei der Mikrostrukturvermessung bewertet.

Unter den betrachteten Verfahren sind solche, die bereits in einem Bild Informationen über die dreidimensionale Position von Objektpunkten liefern, d.h. daß die Position in einer Ebene parallel zur Bildebene aus der Lage der Punkte im Bild hervorgeht, während sich die Position in der dritten Raumrichtung aus der Helligkeit des Bildpunktes ergibt (Abstandsbilder). Bei anderen Verfahren, bei denen dreidimensionale Objekte auf eine zweidimensionale Bildebene projiziert werden, ergeben sich die Konturen des Objekts aus Helligkeitsunterschieden (Intensitätsbilder). Hier reicht ein Bild zur Erfassung von 3D-Meßwerten nicht aus. Ferner ist bei einigen Verfahren eine eindeutige Unterscheidung zwischen Bildaufnahme und 3D-Meßwerterfassung nicht möglich.

Die Aufgaben der digitalen Bildanalyse für die Objekterkennung beim gewählten Verfahren werden in Kapitel 2.3 diskutiert. Sie können dann entsprechend bei der Konzeption des 3D-Vermessungssystems (Kapitel 3) berücksichtigt werden.

### 2.1 Wahl eines Meßverfahrens

Zunächst wird ein Katalog von Anforderungen an das Meßverfahren erstellt, die für die Erfüllung der gestellten Aufgabe wesentlich sind und als Kriterien bei der Auswahl des geeignetsten Verfahrens dienen.

- Es muß möglich sein, in den Bildern die Konturen der Strukturen darzustellen, damit eine Erkennung von Ecken und Kanten durch geeignete Software durchgeführt werden kann. Diese Erkennung bildet auch die Grundlage für die Erkennung höherdimensionaler Merkmale wie Strukturflächen und komplette Strukturen.
- Es darf keine Einschränkung bezüglich geometrischer Formen geben. Es sollen auch Strukturen mit gekrümmten Flächen abgebildet werden.
- Vermessungen sollten in einem Meßbereich möglich sein, der etwa der Ausdehnung einzelner Mikrostrukturen entspricht. Als Richtwert wird hier die Höhe von LIGA-Strukturen angesetzt, das sind mehrere 100  $\mu\text{m}$ .
- Beim LIGA-Verfahren liegen die kleinsten lateralen Strukturdetails, die derzeit herstellbar sind, in der Größenordnung von 100 nm. Es wird daher eine entsprechend hohe Auflösung gefordert. Je nach Verfahren (z.B. bei Abstandsbildern) kann dabei zwischen lateraler und vertikaler Auflösung unterschieden werden. Bei Intensitäts-



bildern ist allein die laterale Auflösung entscheidend; die vertikale Auflösung ergibt sich durch die jeweilige Lage eines Strukturdetails relativ zur Bildebene. Es wird betont, daß eine hohe Auflösung allein noch keine Garantie für eine entsprechend hohe Meßgenauigkeit ist, da diese von mehreren Faktoren abhängt.

- Die Verfahren werden auch dahingehend bewertet, wie gut sich Strukturdetails innerhalb tiefer Gräben und Einschnitte abbilden lassen. Gerade beim LIGA-Verfahren ist es wegen des hohen Aspektverhältnisses häufig der Fall, daß sehr hohe Strukturen bzw. Strukturteile dicht nebeneinander stehen. Je besser die Abbildungseigenschaften des Bildaufnahmeverfahrens in dieser Hinsicht sind, umso eher können Messungen auch innerhalb solcher Bereiche durchgeführt werden.
- Da bei einer dreidimensionalen Szene gegenseitige Verdeckungen von Objekten sowie Eigenverdeckungen auftreten, muß eine Bildaufnahme aus unterschiedlichen Richtungen möglich sein. Da sich die Mikrostrukturen auf einem ebenen Substrat befinden, steht für die Wahl von Blickrichtungen theoretisch ein Raumwinkel  $2\pi$  zur Verfügung.
- Die Substratabmessungen müssen berücksichtigt werden. Höhe und Breite der Substrate betragen etwa 10-20 cm, die Dicke etwa 1 cm.
- Mikrostrukturen können aus unterschiedlichen Materialien bestehen. In der LIGA-Technik treten Resiststrukturen aus PMMA sowie Strukturen aus verschiedenen Metallen und Kunststoffen auf. Eine zuverlässige Vermessung muß unabhängig vom Material erfolgen können.
- Es muß möglich sein, das Aufnahmegerät durch einen externen Rechner zu bedienen, damit der Meßablauf automatisiert werden kann. Um Mustererkennung mit Hilfe von Bildverarbeitungssoftware durchführen zu können, müssen digitale Ergebnisbilder vorliegen.
- Die Verfahren sind auch hinsichtlich der Zeitdauer für die Bildakquisition zu bewerten, da diese Zeiten eine wesentliche Rolle für die gesamte Meßzeit spielen.
- Die Mikrostrukturen dürfen bei der Vermessung selbstverständlich weder verändert noch zerstört werden.

Im folgenden werden, beginnend mit der optischen Mikroskopie, die betrachteten Verfahren erläutert und nach dem Anforderungskatalog bewertet.

### Konventionelle Mikroskopie

Sowohl Resist- als auch Metallstrukturen wurden unter einem *Standard-Lichtmikroskop* betrachtet. Dabei zeigten sich einige Probleme, die zwar bei einem normalen Lichtmikroskop am stärksten auftreten, dann aber in unterschiedlichem Maße bei anderen optischen Verfahren ebenfalls vorhanden sind:

- Die geringste Schwierigkeit besteht dabei noch bei der Auflösung, die physikalisch bedingt im Bereich der Wellenlänge  $\lambda$  des verwendeten Lichts liegt. Dieser Bereich erstreckt sich für sichtbares Licht von 300-700 nm. Die kleinsten realisierbaren Strukturdetails liegen etwas unterhalb der Auflösungsgrenze und es ist in Zukunft mit noch weiterer Verkleinerung zu rechnen.
- Besonders bei hohen Vergrößerungen wird die Schärfentiefe sehr gering. Kanten können praktisch nur dann scharf abgebildet werden, wenn sie parallel zur Fokusebe-

ne verlaufen. Im allgemeinen Fall sind kaum brauchbare Konturen im Bild auszumachen.

- die Abbildung von Resiststrukturen aus PMMA wird zusätzlich erschwert durch dessen Transparenz und dem daraus resultierenden sehr komplizierten Reflexions- und Streuverhalten. Allgemein ist die Abbildungsqualität bei optischen Verfahren stark von den Reflexionseigenschaften der betrachteten Materialien abhängig.
- Ein Verkippen der Proben in einem Mikroskop ist schon aus Platzgründen nur sehr eingeschränkt möglich, da besonders bei hoher Vergrößerung der Arbeitsabstand zwischen Objektiv und Objekt sehr gering ist. Verkippen ist aber für eine vollständige 3D-Kontrolle unumgänglich.

### Konfokale Mikroskopie

Derzeitiger Höhepunkt in der Entwicklung der optischen Mikroskopie sind Mikroskope, die nach dem *konfokalen Prinzip* arbeiten (Abb. 2): Ein Lichtpunkt, z.B. von einer Lochblende, wird auf eine Objektoberfläche abgebildet, dort reflektiert und in Autokollimation mit einem Punktdetektor detektiert. Bei optimaler Fokussierung ist der Lichtfluß am Detektor maximal [26]. Bei Defokussierung verbreitert sich das Punktbild, was bei normaler Detektion in einem konventionellen Mikroskop zu einem verwaschenen Gesamtbild eines Objekts mit größeren Profilvariationen führt. Im konfokalen Mikroskop wird der zentrale Bereich des Punktbilds ausgeblendet und dieser wird bei Defokussierung rasch dunkler. Dadurch ergeben sich für eine feste  $z$ -Position der Probe nur für Punkte mit optimaler Fokussierung, d.h. für einen schmalen  $z$ -Bereich in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lichts, helle Bildpunkte. Die genaue Fokustiefe hängt von der Wellenlänge und vom Aperturwinkel ab. Geeignete Lichtquellen sind Laser aber auch inkohärente Lichtquellen, da die Messungen phasenunabhängig sind. Die derzeit leistungsfähigsten optischen Mikroskope sind die sog. *Laser-Scanning-Mikroskope*.

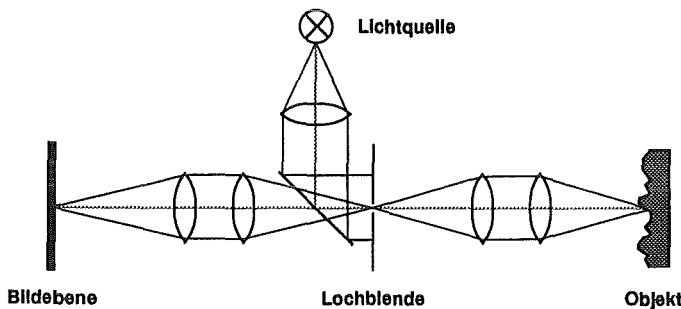


Abb. 2  
Prinzip der konfokalen Mikroskopie [26]:

Ein Lichtpunkt (Lochblende) wird auf die Objektoberfläche abgebildet, reflektiert und in Autokollimation detektiert. Bei optimaler Fokussierung ist der Lichtfluß durch die Lochblende maximal.

Die Punktdetektion macht ein Rastern in  $x,y$ -Richtung notwendig. Zur Messung der Profilhöhe  $h(x,y)$  kann nun prinzipiell nach zwei Methoden vorgegangen werden [27]. Einmal wird für verschiedene feste  $z$ -Positionen ein vollständiges  $x,y$ -Bild aufgenommen. In jedem Bild werden nur Objektpunkte, die sich im Fokus befinden, hell, die anderen dunkel erscheinen. Es kann nun entweder für jeden Punkt mit maximalem Lichtfluß die entsprechende  $z$ -Position bestimmt werden oder alle Bilder für die verschiedenen  $z$ -Positionen können zu einem Gesamtbild mit hoher Schärfentiefe addiert werden. Der Meßbereich ist theoretisch unbegrenzt und hängt vom gesamten Verfahrensweg in  $z$ -Richtung ab. Zum anderen kann die Probe in  $z$  periodisch verfahren werden. Dabei wird die Amplitude so gewählt, daß der gewünschte Meßbereich abgedeckt ist. Die Fre-

quenz dieser periodischen Bewegung muß ausreichend groß gewählt werden, damit in der Zeit, in der beim Rastern ein bestimmter Punkt beleuchtet wird, dieser mindestens einmal im Fokus liegt. Nachdem einmal in  $x,y$ -Richtung gerastert wurde, liegt dann wieder ein Bild mit hoher Schärfentiefe vor. Auch hier kann die  $z$ -Position eines Punktes direkt gemessen werden, indem eine Auswerteelektronik feststellt, zu welchem Zeitpunkt während einer Periode der  $z$ -Bewegung dieser Punkt im Fokus liegt. Die Rastergeschwindigkeit und die Frequenz der  $z$ -Bewegung müssen aufeinander abgestimmt sein. Um die Zeiten, die zum Scannen in  $x$  und  $y$  nötig sind, abzukürzen, wurden sog. *Echtzeit-Mikroskope* vorgeschlagen ("real-time confocal scanning optical microscope", RSOM), bei denen ein Punktmuster z.B. durch eine rotierende Nipkow-Scheibe generiert wird [28][29].

Für die vertikale Auflösung werden in der Literatur Werte bis zu 20 nm angegeben. Die laterale Auflösung eines konfokalen Mikroskops ist etwa doppelt so groß wie die eines normalen Lichtmikroskops.

Bedingt durch die hohen Auflösungen und die hohen Meßbereiche bietet die konfokale Mikroskopie im Vergleich mit anderen Mikroskopen gute 3D-Abbildungsmöglichkeiten, die vor allem bei Anwendungen in der Biologie und der Medizin geschätzt werden. Die Möglichkeiten, Gesamtbilder der zu untersuchenden Objekte zu erzeugen sowie Profilhöhen direkt zu messen, sind ein bedeutender Vorteil des Verfahrens. Daß ein Verkippen, zumindest in begrenztem Umfang, möglich ist, zeigen Resultate an gekippten mikroelektronischen Strukturen, von denen in der Literatur berichtet wird [29]. Wie bei allen Mikroskopen sind aber wegen geringer Arbeitsabstände Beschränkungen beim Verkippen zu erwarten. Tests an einem Laser-Scanning-Mikroskop haben gezeigt, daß vor allem die Abbildung von Strukturkanten an hohen Stufen und von transparenten Objekten nicht zufriedenstellend ist.

### Optische Nahfeldmikroskopie

Eine weitere Möglichkeit, dreidimensionale Variationen eines Objekts aufzuzeichnen, ist durch die *optische Nahfeldmikroskopie* gegeben, deren Arbeitsweise anhand Abb. 3 erläutert wird: Ab einem bestimmten kritischen Winkel kommt es beim Auftreffen von Licht aus einem Medium mit Brechungsindex  $n_1$  auf die Grenzfläche zu einem Medium mit  $n_2 < n_1$  zu Totalreflexion. Dabei dringen Photonen in das Medium 2 ein, ohne jedoch Energie zu übertragen. Die Feldstärke im Medium 2 nimmt exponentiell mit dem Abstand  $z$  zur Grenzfläche ab. Die Eindringtiefe, bis zu der die Feldstärke noch gemessen werden kann, beträgt  $\sim 0.75\lambda$  ( $\lambda$ : Wellenlänge). Wird ein

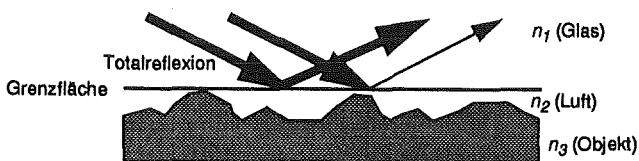


Abb. 3

*Photonen-Tunneln: Dargestellt sind zwei Lichtstrahlen, die an der Grenzfläche zweier Medien ( $n_2 < n_1$ ) totalreflektiert werden. Abhängig vom Abstand eines Objektes mit  $n_3 > n_2$  zur Grenzfläche findet eine Energieübertragung statt, die die Intensität schwächt. Diese Intensitätsabschwächung ist ein Maß für die Profilvariationen des Objekts.*

drittes Medium mit  $n_3 > n_2$  in die Nähe der Grenzfläche gebracht, können die Photonen mit einer Wahrscheinlichkeit, die exponentiell mit  $z$  abnimmt, in das Medium 3 tunneln. Es findet eine entsprechende Energieübertragung statt. Die Intensität des an der Grenzfläche zwischen Medi-

um 1 und 2 reflektierten Lichts wird dadurch entsprechend der Mikrotopographie von Medium 3 moduliert und man erhält, falls dieses isotrop in den optischen Konstanten ist, ein Grauwertbild mit Informationen über die Topographie. Die exakte Abhängigkeit der Energieübertragung auf Medium 3 kann für nicht absorbierende Materialien berechnet und ansonsten durch Kalibrierung bestimmt werden.

Beispiele für die Anwendung der optischen Nahfeldmikroskopie sind das *Photon-Tunnel-Mikroskop* nach Guerra [30], mit sehr kleiner vertikaler Auflösung und einer lateralen Auflösung von  $\sim 0.29\lambda$ . Verschiedene Rasterverfahren [31] können die laterale Auflösung weiter verbessern.

Aufgrund der geringen Eindringtiefe des Nahfeldes können beim Photon-Tunnel-Mikroskop nur entsprechend gering variierende Oberflächen abgebildet werden. Die optische Nahfeldmikroskopie ist daher insbesondere für die hochaufgelöste Bestimmung der Mikrotopographie ansonsten ebener Probenoberflächen einsetzbar. Für eine Anwendung bei der Vermessung von Mikrostrukturen eignet sich diese Methode nicht.

## Interferometrie

Bei *interferometrischen Verfahren* zur Bestimmung der Oberflächenstruktur eines Objekts wird eine Objektwelle mit einer Referenzwelle überlagert und erzeugt ein Interferenzmuster, das mit Bildverarbeitungsmethoden auch automatisch ausgewertet werden kann [32]. Die Strukturhöhe ergibt sich dabei durch die Phasenänderung aufgrund der unterschiedlichen optischen Weglängen für Objekt- und Referenzstrahlen. Dies setzt die Verwendung von hinreichend kohärentem Licht voraus, d.h. die Kohärenzlänge muß mindestens so groß sein wie die höchste auftretende Differenz in den optischen Weglängen. Eine weitere wichtige Voraussetzung ist eine ausreichende Reflektivität der Objekte. Die wesentlichste Einschränkung bei interferometrischen Vermessungen sind Mehrdeutigkeiten bei Phasendifferenzen  $>2\pi$ , d.h. Differenzen in der optischen Weglänge, die größer sind als die Wellenlänge  $\lambda$ . Ohne spezielle Techniken lassen sich größere Strukturhöhen nicht bestimmen. Der Eindeutigkeitsbereich kann zunächst dadurch vergrößert werden, daß Licht mit größerer Wellenlänge verwendet wird (z.B. CO<sub>2</sub>-Laser mit  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ). Inkrementale Methoden funktionieren bei Oberflächen, deren Höhe allmählich variiert, durch Abzählen aufeinanderfolgender Hell-Dunkel-Übergänge. Für diese Aufgabe kann spezielle Bildverarbeitungssoftware eingesetzt werden. *Heterodyn-* und *Zwei-Wellenlängen-Interferometrie* benutzen zwei verschiedene Frequenzen bzw. Wellenlängen [33][34][26][35]. Während Heterodyn-Verfahren durch zeitabhängige Phasenänderung eine Verbesserung der Auflösung bewirken, nutzt man die kleinere Schwebungsfrequenz bzw. die entsprechend größere Wellenlänge bei Zwei-Wellenlängen-Verfahren zur Erweiterung des Eindeutigkeitsbereichs.

Interessant ist vor allem die Zwei-Wellenlängen-Methode, da sie eine Möglichkeit zur Erweiterung des Eindeutigkeitsbereichs und damit des Meßbereichs bei interferometrischen Verfahren bietet. Es werden zwei Interferenzmuster überlagert, die bei unterschiedlicher Wellenlänge erhalten wurden. Mit  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  ergibt sich eine sog. äquivalente Wellenlänge  $\lambda_{\text{eq}} = \lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 - \lambda_2)$ . Sie ist für kleine Wellenlängendifferenzen größer als  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ . Die beiden überlagerten Wellen werden sowohl als Objekt- als auch als Referenzstrahl benutzt. Zur Verbesserung der Vertikalauflösung können die Referenzwellen zusätzlich frequenzmoduliert werden (*2- $\lambda$ -Heterodyn-Interferometrie*). Die Lateralauflösung liegt im Bereich der verwendeten Wellenlängen.

Ferner wurden die *holographische Interferometrie* [36] und die *Speckleinterferometrie* [37] in Betracht gezogen.

In der holographischen Interferometrie gibt es drei grundlegende Techniken: *statische Doppelbelichtung*, *Echtzeit-Holographie* und die *dynamische Methode*. Ohne zusätzliche Techniken eignen sich alle drei Methoden nicht für Bestimmungen der Geometrie von Objekten. Es ist allenfalls denkbar, einzelne Strukturmerkmale zu ermitteln; eine genaue und vollständige Vermessung kommt nicht in Betracht. Es gibt jedoch auch hier Zwei-Wellenlängen-Verfahren, die für eine Konturierung von Objekten eingesetzt werden können. Darüberhinaus werden diese Techniken bei makroskopischen Objekten eingesetzt, vorwiegend um zeitliche Veränderungen des Objekts zu untersuchen.

Die gleichen Aussagen gelten für die Anwendungsmöglichkeiten der Speckleinterferometrie, bei der die körnige Struktur eines Laserspots auf einer rauhen Oberfläche ausgenutzt wird.

In bezug auf die Höhenauflösung sind interferometrische Verfahren für die Vermessung von Mikrostrukturen gut geeignet. Mit Heterodyn- und Quasi-Heterodyn-Methoden existieren Verfahren, die nach unten einen mehr als ausreichenden Spielraum lassen. Die Lateralauflösung im Bereich der Wellenlänge ist, wie bei allen optischen Verfahren, bei den kleinsten auftretenden Strukturdetails nicht ausreichend. Probleme bereitet in allen Fällen der Meßbereich, der mindestens einige 100  $\mu\text{m}$  betragen sollte. Inkrementale Methoden erreichen bestenfalls 10-20  $\mu\text{m}$  und versagen bei großen Profilsteigungen und Stufen, wie sie gerade bei mikromechanischen Strukturen auftreten. Hier kommt neben der Kohärenzmikroskopie (s. unten) nur ein Zwei-Wellenlängen-Verfahren in Betracht, das allerdings eine Ausdehnung des Meßbereichs lediglich auf einige 10  $\mu\text{m}$  erlaubt. In der holographischen Interferometrie kann ein Zwei-Wellenlängen-Verfahren zur Konturierung bei makroskopischen Objekten angewandt werden. Unabhängig davon, welche Möglichkeiten für eine Anwendung bei mikromechanischen Strukturen vorhanden sind, besteht bei der Holographie der Nachteil, daß das Hologramm nach der Aufnahme erst entwickelt werden muß. Speckleinterferometrie kann im  $\mu\text{m}$ -Bereich nur zur Untersuchung der Rauigkeit von Oberflächen eingesetzt werden. Neben der schlechten Lateralauflösung und der größten Schwierigkeit, den Mehrdeutigkeiten, existieren bei interferometrischen Verfahren weitere Probleme, vor allem in bezug auf das Reflexionsverhalten der zu untersuchenden Objekte. So erhält man etwa bei PMMA infolge seiner Transparenz Reflexionen an mehreren übereinanderliegenden Flächen. Weitere Schwierigkeiten treten auf durch die Reflexion an Kanten, die jedoch als wichtigstes Strukturmerkmal besonders interessant sind, sowie bei der Reflexion an schrägen Flächen. Hier kann durch eine Doppelpaß-Strahlführung Abhilfe geschaffen werden, allerdings nur in begrenztem Umfang und nur bei hoher Reflektivität des Objektmaterials [38]. Bei Rasterverfahren sind die Meßzeiten unakzeptabel hoch.

Experimentell wurde die Anwendungsmöglichkeit eines *Polarisationsinterferometers* an einem Standard-Lichtmikroskop untersucht. Das Objekt wird durch ein Quarzdoppelprisma hindurch zweimal abgebildet, und zwar beide Bilder leicht gegeneinander gekippt und versetzt. Es kommt zu Interferenzen zwischen beiden Bildern. Für jeden Punkt der Objektoberfläche ist ein Nachbarpunkt der gleichen Oberfläche der Referenzpunkt. Die entstehende Versetzung muß größer sein als das zu untersuchende Objektdetail und dieses Detail muß mit einer es umgebenden ebenen Fläche als Bezugsfläche verglichen werden. Bei Mikrostrukturen mit Objektdetails verschiedener Größenordnung kann eine gegebene Versetzung immer nur für einen Teil aller Details optimal gewählt werden. Daneben ist nicht gewährleistet, daß die Umgebung eines Details ausreichend eben ist. Weiter bestehen an Stufen die gleichen Probleme wegen fehlender Eindeutigkeit wie bei allen interferometrischen Methoden. Aus diesen Gründen kann davon ausgegangen werden, daß bei einem Polarisationsinterferometer die Vermessungsmöglichkeiten für Mikrostrukturen nicht ausreichend sind.

## Kohärenzmikroskopie

Die bei interferometrischen Verfahren bestehenden Möglichkeiten zur Erweiterung des Meßbereichs (Zwei-Wellenlängen-Interferometrie, größere Wellenlänge, inkrementale Methoden bei allmählicher Profilsteigung) sind bei hohen Mikrostrukturen nicht ausreichend. In der *Kohärenzmikroskopie* kann der Meßbereich darüber hinaus erweitert werden, indem die Eigenschaften von teilweise kohärentem Licht ausgenutzt werden. Der Meßbereich ist bei dieser Technik theoretisch unbegrenzt. In der Praxis wurden bei bisherigen Anwendungen leicht einige 100  $\mu\text{m}$  erreicht [39].

Die Ausrüstung besteht aus einem Mikroskop in Verbindung mit einem geeigneten Interferometer und einer Kamera zur Bildaufnahme. Verwendet wird räumlich inkohärentes und zeitlich teilweise kohärentes Licht. Zunächst führt die räumliche Inkohärenz zu verbesserter lateraler Auflösung gegenüber konventionellen Mikroskopen, und zwar etwa doppelte Auflösung, wie auch bei konfokalen Mikroskopen. Vereinfacht dargestellt bedeutet teilweise zeitliche Kohärenz, daß das Licht in Wellenzügen endlicher Länge ausgesandt wird. Ist die Wellenlänge für Objekt- und Referenzstrahl gleich, überlagern sich entsprechende Wellenzüge vollständig und es kommt zu maximaler Interferenz. Bei wachsender Weglängendifferenz ist die Überlagerung der Wellenzüge nur noch teilweise und die Intensität der Interferenzstreifen nimmt ab, bis schließlich keine Überlagerung und somit keine Interferenzstreifen mehr vorliegen. Die Abnahme der Intensität wird durch die Kohärenzfunktion beschrieben. Wenn das Objekt in vertikaler ( $z$ -) Richtung verschoben und dabei eine Folge von Bildern aufgenommen wird, ergibt sich für jeden Bildpunkt ( $x,y$ ) maximale Intensität bei der  $z$ -Position, bei der die Weglängen zum Objektpunkt und zum korrespondierenden Punkt des Referenzspiegels gleich sind. Wird nun die  $z$ -Position dieses Maximums der Kohärenzfunktion für jeden Punkt über  $x$  und  $y$  aufgetragen, ergibt sich eine dreidimensionale Darstellung der Objektstruktur. Die vertikale Auflösung wird durch die zeitliche Kohärenz bestimmt, d.h. durch die Form der Kohärenzfunktion und damit der Genauigkeit, mit der ihr Maximum ermittelt werden kann. Sie kann in der Größenordnung von 10 nm liegen. Das Prinzip der Kohärenzmikroskopie wird durch die Wahl unterschiedlicher Interferometer und Mikroskopkonfigurationen realisiert.

Beim Kohärenzmikroskop ("coherence scanning microscope") von Lee und Strand [39] wird ein kommerzielles *Michelson-Interferometer* als Zusatz zu einem Standard-Mikroskop verwendet. Die Bezeichnung "scanning" bezieht sich auf das Scannen in  $z$ -Richtung. Die Bildaufnahme erfolgt über eine CCD-Kamera. Die Einrichtung ist computergesteuert. Davidson et al. [40] verwenden ein *Linnik-Mikroskop*, bei dem sich in beiden Strahlengängen eines Michelson-Interferometers identische Objektive befinden. Kino und Chim [41] benutzten ein *Mirau-Interferometer*, bei dem die Wege von Objekt- und Referenzstrahl z.T. identisch sind. Der Vorteil ist eine geringere Vibrationsempfindlichkeit.

Als Verwendungsmöglichkeit der Kohärenzmikroskope wird vor allem die Kontrolle und Vermessung integrierter Schaltkreise angestrebt. Das Konzept von Davidson et al. ist bereits in einem Produkt (KLA 5000) der Firma KLA Instruments Corporation, Santa Clara, CA realisiert [42]. Vermessen werden hauptsächlich Linienbreiten an der Ober- und Unterseite der mikroelektronischen Strukturen.

Der große Vorteil der Kohärenzmikroskopie gegenüber anderen optischen Verfahren liegt in dem großen Meßbereich, der für die Anwendung bei mikromechanischen Strukturen ausreichend ist. Die verbesserte laterale Auflösung ist ein weiterer Vorteil gegenüber anderen Mikroskopen. Der größte Nachteil besteht darin, daß nicht alle Merkmale einer Mikrostruktur

zufriedenstellend abgebildet werden können. Vor allem ergibt sich bei schrägen Flächen keine Interferenz und auch schmale Gräben mit einem ebenen Boden bereiten schon bei geringem Aspektverhältnis Probleme bezüglich der gewünschten Genauigkeit. Schon wegen der Schwierigkeiten mit schrägen Flächen kommt es nicht in Frage, Objekte zu kippen, um einzelne Strukturelemente von der Seite abzubilden, weil dann fast alle Flächen schräg zur optischen Achse liegen. Auch bei der Kohärenzmikroskopie gibt es Probleme mit transparenten Objekten. Im Vergleich mit anderen optischen Verfahren ist die Kohärenzmikroskopie eine Methode, mit der sich in gewissem Umfang dreidimensionale Abbildungen realisieren lassen und zwar auch von mikromechanischen Strukturen. Es sind bereits Konzepte verwirklicht, die Vermessungen in  $\mu\text{m}$ -Bereich zulassen. Um eine möglichst vollständige 3D-Beschreibung von Mikrostrukturen zu erhalten, reichen die Möglichkeiten der Kohärenzmikroskopie jedoch nicht aus.

### Optische Bildebenen-Lokalisierung

Das Prinzip der Profilhöhenmessung mit *optischen Bildebenen-Lokalisierungssystemen* ist die Bestimmung der Fokusslage von Objektpunkten. Nach der Methode des photometrischen Gleichgewichts (Lichtwaage) arbeitet das *Balance-Verfahren* (Abb. 4) [38][43]: Ein Laserstrahl wird durch ein Abtastobjektiv auf die Probenoberfläche gerichtet, läuft nach der Reflexion auf dem gleichen Weg zurück und wird über einen Strahlteiler ausgekoppelt. Danach passiert der Strahl eine Linse zur Fokussierung und einen zweiten Strahlteiler. Einer der Teilstrahlen trifft auf einen extrafokal, der andere auf einen intrafokal positionierten Punktdetektor (Detektor + Lochblende). Ein Differenzverstärker liefert die Differenz der beiden Intensitäten  $I_1 - I_2$ , bzw. die normierte Differenz  $(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ . Diese Differenz ist ein Maß für die lokale Strukturhöhe

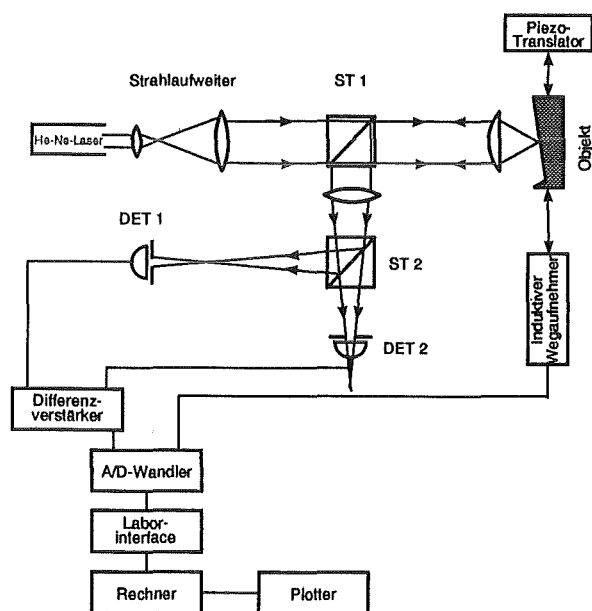


Abb. 4

Prinzip des Balance-Verfahrens [38]:

DET1, DET2: extrafokal bzw. intrafokal positionierter Punktdetektor

ST1, ST2: Strahlteiler

Zur Auswertung der Messungen ist Rechnerunterstützung notwendig.

$h(x,y)$  relativ zu einer Nullstellung mit  $I_1 = I_2$ , bei der der Strahl exakt auf die Probenoberfläche fokussiert ist. Die Bestimmung von  $h(x,y)$  aus der Intensitätsdifferenz erfolgt über eine Kalibrierkurve. Dabei gibt es an verschiedenen Stellen rauher Oberflächen Unterschiede in den Koeffizienten des Kalibrierpolynoms, was zu Meßfehlern führt. Verbesserungen können hier

durch die o.g. Normierung der Differenz erzielt werden, allerdings kann das Problem so nicht vollständig beseitigt werden. Weitere Schwierigkeiten gibt es an Stellen hoher Profilsteigung. Scheinauflösungen und Fehlmessungen treten auf. Eine Doppelpaß-Strahlführung zur Steigungskompensation ist hier sinnvoll. Vertikal können Auflösungen im nm-Bereich erzielt werden, lateral beträgt die Auflösung etwa  $0.5 \mu\text{m}$ . Der Meßbereich ist zunächst durch den Linearitätsbereich der Kalibrierkurve bestimmt, kann jedoch durch Nachfokussierung erweitert werden. In der Literatur wird ein Verhältnis Meßbereich zu vertikaler Auflösung von 300:1 genannt [38]. Eine Verbesserung dieses Verhältnisses ist mit der Nullmethode möglich. Dabei wird das Abtastobjektiv für jeden Objektpunkt auf die richtige Fokussierposition eingestellt (Intensitätsdifferenz an den beiden Detektoren Null) und  $h(x,y)$  über eine Messung der Objektivposition bestimmt. Diese Methode ist allerdings langsamer und empfindlicher für Störungen.

Ein ebenfalls auf dem Prinzip des photometrischen Gleichgewichts basierendes Verfahren ist das *Foucault-Verfahren*, das ähnlich aufgebaut ist wie das Balance-Verfahren. Das *Astigmatische Fokussierverfahren* zählt ebenfalls zu den Methoden der optischen Bildebenen-Lokalisierung [43].

Die vertikale Auflösung ist bei allen Verfahren ausreichend; die lateralen Auflösungen sind jedoch nicht völlig zufriedenstellend. Die Meßfehler an Kanten und größeren Profilsteigungen machen die Verfahren für Anwendungen bei mikromechanischen Strukturen unbrauchbar. Sowohl bezüglich einer Verkippung des Objekts als auch bezüglich der Abbildung von transparenten Strukturen bestehen die gleichen Nachteile wie bei interferometrischen Methoden. Auch die hohen Meßzeiten beim Rastern in  $x,y$ -Richtung sind unerwünscht. Es gibt einige kommerziell verfügbare optische Taster, die jedoch für einfachere Anwendungen als die 3D-Vermessung von Mikrostrukturen konzipiert wurden [26].

## Radarverfahren

*Radarverfahren* arbeiten punktweise. Sie messen direkt die Entfernung zwischen verschiedenen Objektpunkten und einem Bezugspunkt und liefern Abstandsbilder. Es werden verschiedene Techniken eingesetzt, um Abstandswerte zu erhalten [44]:

Bei *Laufzeitmessungen* mit kurzzeitigen Signalen ist das Maß für die Entfernung zum Objektpunkt die Zeit zwischen Aussenden und Empfang eines Impulses. Die Technik wird eingesetzt für Entfernungsmessungen im m-Bereich mit Auflösungen im mm-Bereich und für geographische Vermessungen vom Flugzeug aus. Bei der *Amplitudenmodulation* einer kontinuierlichen Welle wird die Phasendifferenz zwischen der ausgesandten und der empfangenen Welle gemessen. Wegen Mehrdeutigkeiten in der Phase bei Differenzen  $>2\pi$  können Entfernungen nur in einem Bereich bis zur halben Wellenlänge der sinusförmigen Modulation bestimmt werden. Solche Mehrdeutigkeiten können softwaremäßig aufgelöst werden, wenn sich die Oberfläche des Objekts nicht zu stark ändert, oder hardwaremäßig durch Verwendung mehrerer Modulationsfrequenzen. Die Verwendung reicht von Entfernungsmessungen in Bereichen der Größenordnung 10 m bis hinunter in den dm-Bereich bei Auflösungen im cm-Bereich bzw. bis zu  $100 \mu\text{m}$ . Schließlich werden bei der *Frequenzmodulation* einer kontinuierlichen Welle Entfernungen durch Messung von Schwebungsfrequenzen (Heterodyn-Techniken) bestimmt. Die Genauigkeiten der Entfernungsbestimmung liegen im mm-Bereich.

Meßbereiche und Auflösungen bzw. Genauigkeiten der verschiedenen Techniken zeigen, daß der Einsatz von Radarverfahren zur 3D-Erfassung nur im makroskopischen Bereich sinnvoll ist.



## Triangulation; Moiré-Verfahren

Neben Radarverfahren basieren verschiedene andere 3D-Meßverfahren für den makroskopischen Bereich auf der *aktiven Triangulation*. Im einfachsten Fall wird dabei ein Lichtpunkt auf das Objekt projiziert und unter einem unterschiedlichen Winkel beobachtet und vermessen [26]. In [44] werden verschiedene Punktabstandssensoren, die auf dieser Methode basieren, vorgestellt. Die meisten dieser Sensoren sind für Anwendungen im makroskopischen Bereich konzipiert. Einige erreichen auch Auflösungen im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich, wobei allerdings mit vertretbarem Zeitaufwand nur einzelne Punkte vermessen werden können.

Die Geschwindigkeit der Vermessungen läßt sich durch strukturierte Beleuchtung steigern, z.B. durch die Projektion einer Linie auf das Objekt (*Lichtschnittverfahren*). Beim *Moiré-Verfahren* wird ein Gittermuster auf die Objektoberfläche projiziert. Es wird entsprechend der Oberflächenvariationen verformt. Durch Vergleich mit einem Referenzmuster lassen sich Höhen-schichtlinien berechnen. Das Moiré-Verfahren eignet sich nur bei allmählich variierenden Oberflächen ohne größere Diskontinuitäten, wie sie bei Mikrostrukturen auftreten [44].

## Röntgenmikroskopie

Die Röntgenmikroskopie deckt den Bereich zwischen optischer und Elektronenmikroskopie ab. Bei Auflösungen von 30-50 nm (noch höhere Auflösung wird angestrebt) und sehr kurzen Belichtungszeiten können insbesondere in der Biologie auch lebende Organismen untersucht werden. Daher richtet sich auch das Hauptaugenmerk der Entwickler auf biologische Anwendungen. Daneben werden aber auch Materialwissenschaften und Oberflächenuntersuchungen als mögliche Einsatzgebiete genannt.

Folgende Techniken können unterschieden werden [45]: In der *Kontaktmikroskopie* durchdringen die Röntgenstrahlen das Objekt und ändern eine dahinterliegende Photolackschicht (z.B. PMMA) in ihrem Ätzverhalten, abhängig von der Objektdicke und dem Material. Nach dem Entwickeln der Photolackschicht kann diese z.B. in einem Elektronenmikroskop betrachtet werden. Bei der *abbildenden Mikroskopie* wird das Röntgenlicht mittels Fresnelscher Zonenplatten auf die Probe und einen dahinterliegenden Film oder elektronischen Detektor fokussiert. Die *Abtastmikroskopie* ist ein Rasterverfahren, das sich besonders gut für die rechnergestützte Bildakquisition eignet. Ferner ist die *Holographie* zu nennen, bei der das Röntgenlicht, das am Objekt vorbeigeht, als Referenzstrahl verwendet wird. 3D-Aufnahmen sind wegen zu geringer Auflösung und Intensität bisher noch nicht möglich.

Die Röntgenmikroskopie befindet sich mitten in einer raschen Entwicklung, die insbesondere auch darauf abzielt, Röntgenquellen mit der erforderlichen hohen Intensität für Geräte im Labormaßstab zu entwickeln. Die Intensität herkömmlicher Röntgenquellen (Röntgenröhren) reicht für mikroskopische Anwendungen i.allg. nicht aus. Für spezielle Anwendungen ist jedoch bei Mikrofokusquellen die Fokussierung des Elektronenstrahls auf ca. 1  $\mu\text{m}$  möglich und damit eine Verstärkung der Intensität. Alle bisher geeigneten Quellen sind Großgeräte, die sich zur Anwendung im Labormaßstab schlecht oder gar nicht eignen [46]. Die wegen der hohen Intensität und der guten Kohärenz am häufigsten genutzte Quelle ist die Synchrotronstrahlung. Röntgenlaser für mikroskopische Zwecke befinden sich in der Entwicklung bzw. werden z.T. auch schon angewandt. Ihre Nutzung beschränkt sich auf Holographie und Kontaktmikroskopie. Ferner existieren verschiedene Arten von Plasmaquellen.

Unabhängig von den Eigenschaften der vier angesprochenen Verfahren gibt es eine Reihe von Argumenten, die gegen einen Einsatz der Röntgenmikroskopie sprechen. Die Röntgenmikroskopie ist ein sehr junges Gebiet und für eine routinemäßige Anwendung im Labormaßstab sind noch sehr viele Entwicklungen, vor allem bei den Röntgenquellen, erforderlich. Das Material der Mikrostrukturen ist nicht geeignet für die Untersuchung im Röntgenlicht. Metall wird von der weichen Röntgenstrahlung nicht durchdrungen; PMMA wird von der Röntgenstrahlung verändert, eine Eigenschaft, die man sich ja gerade bei der Herstellung einer Resiststruktur und auch in der Röntgenmikroskopie bei der Bildaufnahme mit Photolacken zunutze macht. Auch die Tatsache, daß sich die Strukturen oft auf dicken Metallsubstraten befinden, macht eine Abbildung unmöglich. Ferner sind beim Umgang mit Röntgenstrahlen wegen der Gefahr von Strahlenschäden immer besondere Sicherheitsmaßnahmen zu treffen.

### Akustische Mikroskopie

Das akustische Mikroskop wird allgemein als Ergänzung zum optischen Mikroskop angesehen. Zum einen können unterschiedliche elastische Eigenschaften verschiedener Objektteile abgebildet werden, zum anderen dringen die Schallwellen in das Objekt ein und ermöglichen so eine Abbildung von Strukturen unter der Oberfläche. Entsprechend eignet sich die akustische Mikroskopie vor allem zur Abbildung von Korngrenzen, Materialdefekten oder z.B. zur Prüfung des Kontakts zwischen einem Substrat und einer darüberliegenden Schicht.

Schallwellen mit Frequenzen im GHz-Bereich werden auf das zu untersuchende Objekt fokussiert. Als Linse dient eine sphärische Grenzfläche zwischen einem Festkörper (z.B. Saphir) und einer Flüssigkeit oder einem Gas. Dieses Medium ist normalerweise Wasser, da es die Schallwellen weniger stark dämmt, als andere zur Verfügung stehende Medien. Erzeugt werden die hochfrequenten Schallwellen in einer piezoelektrischen Schicht, die auf die Rückseite des Saphirs aufgebracht ist. Mit der gleichen Schicht werden die reflektierten Wellen empfangen. Dabei ist die Spannung, die in dieser Schicht erzeugt wird, vom Abstand der Objektoberfläche zur Fokusebene abhängig. Dieses Signal kann nun z.B. die Intensität eines Elektronenstrahls in einem Monitor steuern. Wegen der Fokussierung der Wellen auf einen kleinen Bereich der Objektoberfläche muß in x- und y-Richtung gerastert werden. Da die piezoelektrische Schicht sowohl als Sender als auch als Empfänger benutzt wird, müssen beide Vorgänge zeitlich voneinander getrennt erfolgen, d.h. die Schallwellen müssen in einzelnen Pulsen ausgesandt werden. Die Unterschiede in der Geschwindigkeit der akustischen Wellen in verschiedenen Medien sind viel größer als bei optischen Linsen die Unterschiede der Lichtgeschwindigkeiten, d.h. die akustische Linse hat einen größeren "Brechungsindex" ( $\sim 10$ ). Dadurch werden Schallwellen wesentlich stärker gebündelt als Lichtwellen und sphärische Aberration stellt keine größere Beeinträchtigung der Abbildungsqualität dar [47].

Die Auflösungen sind wie beim optischen Mikroskop von der Wellenlänge abhängig. Diese wiederum hängt von der Frequenz und von der Geschwindigkeit im Übertragungsmedium ab. Mit den Möglichkeiten zur Verwendung sehr hoher akustischer Frequenzen und mit der Geschwindigkeit von Schallwellen in Wasser können Wellenlängen erreicht werden, die mit denen von sichtbarem Licht vergleichbar sind. Die laterale Auflösung ergibt sich durch den Fokusedurchmesser, der bei einer Frequenz von 2 GHz bei  $0.6 \mu\text{m}$  liegt. Eine Verbesserung der Auflösung erfordert höhere Frequenzen und wegen der damit verbundenen stärkeren Dämpfung der Schallwellen in Wasser ein anderes Übertragungsmedium, d.h. z.B. flüssiges Helium oder gasförmige Medien unter hohem Druck [48].

Bisher verfügbare Rastermikroskope sind bezüglich Auflösung und Schärfentiefe ähnlich zu bewerten wie normale optische Mikroskope, die ohne weiteres nicht einsetzbar sind. Wegen der starken Bündelung der Schallwellen an der akustischen Linse ist der Arbeitsabstand sehr gering (einige 10  $\mu\text{m}$ ). Da LIGA-Strukturen bis zu einer Größenordnung höher sein können, wäre somit nur eine Abbildung des oberen Teils der Strukturen möglich. Auch eine Abbildung schräg von der Seite ist durch diesen geringen Arbeitsabstand ausgeschlossen. Die Verwendung von Übertragungsmedien wie Wasser ist bereits problematisch. Flüssige Gase bei extrem tiefen Temperaturen, wie sie zur Verbesserung der Auflösung nötig sind, kommen erst recht nicht in Frage. Diese Argumente zeigen, daß auch das akustische Rastermikroskop kein geeignetes Instrument zur Abbildung von Mikrostrukturen ist.

Bei der *akustischen Nahfeldmikroskopie* befindet sich die schwingende Spitze eines Quarz-Oszillators in unmittelbarer Nähe des Objekts. Frequenz und Amplitude ändern sich in Abhängigkeit vom Abstand. Es sind Auflösungen bis zu 5 nm erreichbar [49]. Für die akustische Nahfeldmikroskopie gelten die gleichen Aussagen wie für die anderen Nahfeldmikroskopien (Optische Nahfeldmikroskopie, Raster-Tunnel- und Kraftmikroskopie). Sie ist zur 3D-Vermessung von Mikrostrukturen nicht einsetzbar.

### Nahfeldmikroskopien

Mit dem *Raster-Tunnel-Mikroskop* lassen sich Strukturen leitender Oberflächen in atomaren Dimensionen auflösen. Zwischen einer feinen Metallnadel, die im Abstand von nur einigen Atomdurchmessern zeilenweise über die Probe geführt wird, und der Oberfläche dieser Probe fließt bei Anlegen eines elektrischen Potentials ein kleiner Tunnelstrom. Dieser Strom hängt stark vom Abstand zwischen Spitze und Probenoberfläche ab [50]. Eine Weiterentwicklung des Rastertunnelmikroskops ist das *Kraftmikroskop*, bei dem abstandabhängige Kräfte zwischen einer feinen Spitze und der Probe gemessen werden. Diese Kräfte können Coulomb-, magnetische, chemische oder van-der-Waals-Kräfte sein. Entsprechend können verschiedene Eigenschaften der Probe untersucht werden [51]. Das Kraftmikroskop hat den Vorteil, daß damit auch nichtleitende Oberflächen in atomaren Dimensionen abgebildet werden können. Eine Vielzahl weiterer Mikroskope sind aus der Raster-Tunnel-Mikroskopie entwickelt worden. Sie messen Wärmeleitfähigkeit, Kapazitätsänderung und ionische Leitfähigkeit. Daneben sind in diesem Zusammenhang auch die *akustische* und die *optische Nahfeldmikroskopie* zu nennen, die bereits in den vorangehenden Abschnitten diskutiert wurden.

Die Darstellung des Oberflächenprofils in atomaren Dimensionen ist bei der 3D-Vermessung von Mikrostrukturen nicht von Interesse. Mit den Nahfeldmikroskopen lassen sich Profilvariationen abbilden, die im Bereich der erreichten Auflösung liegen, d.h. einzelne Atome bzw. Atomgruppen. Mit einem Kraftmikroskop auf der Basis der van-der-Waals-Kräfte lassen sich auch mesoskopische Strukturen abbilden, die in der Größenordnung von 10 nm liegen. Eine Erfassung von Profilsprüngen, die um Größenordnungen über der Auflösung liegen, ist nicht machbar.

### Elektronenmikroskopie

In der *Rasterelektronenmikroskopie (REM)* wird die Probe im Vakuum mit einem Elektronenstrahl zeilenweise abgerastert (Scannen). Die Elektronen werden durch ein System von magnetischen Linsen fokussiert und abgelenkt (Abb. 5). Beim Auftreffen der Elektronen auf die Probe

und Eindringen in die Probenmaterie wechselwirken die Elektronen des Strahls mit den Elektronen des Festkörpers auf komplexe Art und Weise. Dabei spielen verschiedene physikalische Effekte eine Rolle [52]:

- Sekundärelektronenemission
- Emission von Röntgenstrahlung
- Kathodenlumineszenz
- in der Probe induzierte Ströme und Spannungen
- Reflexion und Transmission von elastisch gestreuten Primärelektronen

Alle diese Effekte können als Kontrastmechanismen genutzt werden, um eine Abbildung der Probe zu erzeugen. Die Signale, die durch diese Effekte hervorgerufen werden, können detektiert werden. Ein Bild wird erzeugt, indem die Intensität des Elektronenstrahls in einem Monitor, der synchron zur Rasterung des Primärelektronenstrahls im Mikroskop den Bildschirm abtastet, durch die jeweilige Signalstärke gesteuert wird. Die dabei erzielte Vergrößerung wird bestimmt durch das Verhältnis von Bildfläche zur Rasterfläche auf der Probe (Abb. 5b). Objekte werden so abgebildet, wie sie ein Betrachter sehen würde, der in Richtung des Primärelektronenstrahls blickt.

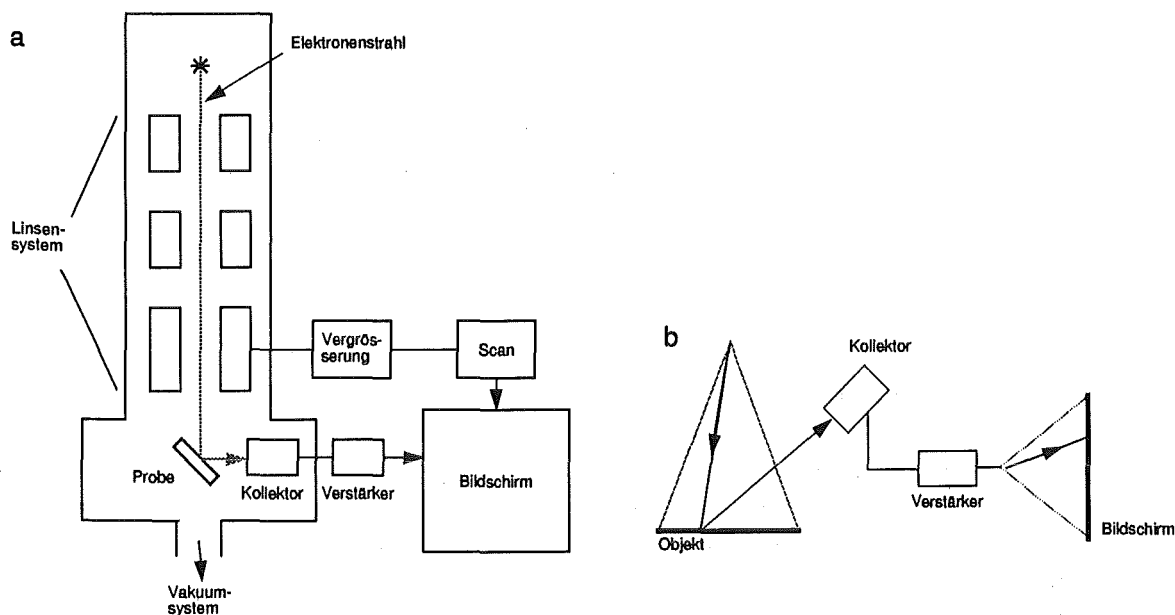


Abb. 5

Blockdiagramm eines Rasterelektronenmikroskops [52]

(a): Die Probe wird mit einem Elektronenstrahl abgerastert. Die aus dem Probenmaterial emittierten Elektronen gelangen in einen Kollektor. Die Stärke des Signals im Kollektor steuert die Intensität des Elektronenstrahls in einem Monitor, der synchron zum Elektronenstrahl im Mikroskop den Bildschirm abtastet (b).

Nicht alle physikalischen Effekte lassen sich bei allen Arten von Proben nutzen. Nur bei der Sekundärelektronenemission und bei der Emission von Röntgenstrahlung kann bei nahezu allen Materialien davon ausgegangen werden, daß sie verwertbare Signale liefern. Die Röntgenstrahlung wird benutzt, um das Material der Probe zu analysieren, und die Sekundärelektronen liefern Informationen über die Topographie der Proben. Die Sekundärelektronenemission ist damit ein geeigneter Effekt, um Abbildungen zu erzeugen, die für Vermessungsaufgaben genutzt

werden können. Daneben kommen auch rückgestreute Primärelektronen und Kathodenlumineszenz zur Erzeugung topographischer Abbildungen in Frage. Durch Messen von Probenströmen und -spannungen werden elektrische Eigenschaften der Probe untersucht.

Im folgenden soll die Sekundärelektronenemission näher betrachtet werden, weil sie sich am besten für die Abbildung der Probentopographie nutzen läßt. Sekundärelektronen sind Elektronen aus dem Probenmaterial, die in einem inelastischen Prozeß von den einfallenden Primärelektronen einen Energiebetrag übernommen haben, der über der Austrittsarbeit für das betreffende Material liegt, so daß sie dieses als freie Elektronen verlassen können. Ihre Energien liegen zwischen 0 und 50 eV, wobei das Maximum in der Energieverteilung abhängig von der Austrittsarbeit zumeist zwischen 2 und 3 eV liegt (Abb. 6). In der Energieverteilung tritt ein weiterer Peak bei der Energie der Primärelektronen auf, der von elastisch gestreuten Primärelektronen herrührt. Zwischen diesem Peak und dem sehr viel größeren Peak der niederenergetischen Sekundärelektronen liegt ein Background von inelastisch gestreuten Primärelektronen.

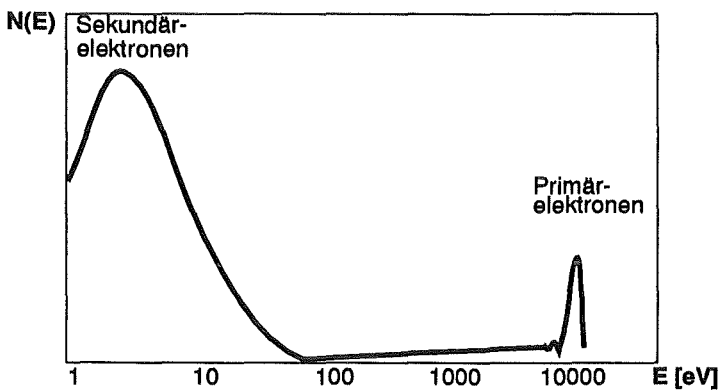


Abb. 6

Energieverteilung der emittierten Elektronen (schematisch) [52]:

Das erste Maximum sind die eigentlichen Sekundärelektronen. Der kleinere Peak am Ende der Energieskala stammt von elastisch gestreuten Primärelektronen. Der Bereich zwischen den Maxima enthält inelastisch gestreute Primärelektronen. Die kleinen Schwingungen am Fuß des Primärelektronenmaximums werden durch Plasmaschwingungen verursacht.

Als Kollektor für Sekundärelektronen ist eine Kombination aus Szintillator und Photomultiplier weit verbreitet, die sich durch ein günstiges Signal-Rausch-Verhältnis auszeichnet [53]. Die aus der Probe austretenden Elektronen werden auf ein Gitter zu beschleunigt, daß sich am vorderen Ende des Detektorsystems befindet und gegenüber der Probe auf positivem Potential liegt. Über einen weiteren Potentialunterschied gelangen die Elektronen zum Szintillator, wo durch den Kathodenlumineszenz-Effekt Photonen erzeugt werden. Im Photomultiplier wird dieses optische Signal mit Hilfe des Photoeffekts verstärkt. Das Ausgangssignal des Detektors wird zur Steuerung der Bildhelligkeit benutzt. Es sind Scan-Raten bis hin zur TV-Rate möglich. Je nach angelegter Kollektorspannung können sukzessive, beginnend bei kleinen Energien, also bei den eigentlichen Sekundärelektronen, Elektronen ausgeschlossen werden. Dies betrifft in erster Linie auch Elektronen, die sich vom Kollektor wegbewegen. Dadurch verändern sich dann auch die Kontrastverhältnisse im Bild, so daß unterschiedliche Informationen gewonnen werden können. Die Gesamtausbeute an Elektronen hängt ab vom Strom der eigentlichen Sekundärelektronen und vom Strom der gestreuten Primärelektronen, der wiederum vom Strom der einfallenden Primärelektronen, ihrer Energie und vom Probenmaterial abhängt.

Der Kontrast im REM-Bild kommt zustande durch unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen elektronischen Eigenschaften und durch unterschiedliche Orientierung der Probenoberfläche zum Kollektor und zur Richtung des einfallenden Elektronenstrahls. An

Objektkonturen entsteht infolge der nicht-stetigen Änderung der Orientierung der Oberflächen in den meisten Fällen ein recht guter Kontrast, so daß Kanten und Ecken zumindest für das menschliche Auge gut sichtbar sind. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird durch verschiedene Faktoren begrenzt: Störeelektronen im Kollektor und Störeffekte in den elektrischen Schaltkreisen tragen dazu bei sowie Effekte aufgrund der endlichen Eindringtiefe der Primärelektronen. Generell kann das Signal-Rausch-Verhältnis durch geringere Scan-Raten verbessert werden.

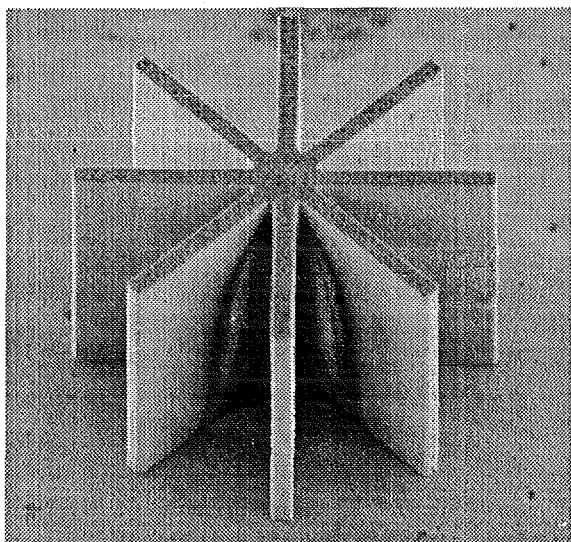


Abb. 7  
REM-Aufnahme einer Mikrostruktur zur Veranschaulichung der hohen Schärfentiefe rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen. Die Strukturhöhe beträgt  $100\ \mu\text{m}$ .

Die Schärfentiefe eines Rasterelektronenmikroskops ist bedeutend größer als bei optischen Mikroskopen. Sie beträgt bei 100-facher Vergrößerung etwa 1 mm und sinkt erst ab etwa 10000-facher Vergrößerung unter  $1\ \mu\text{m}$  [54]. Es besteht die Möglichkeit, Objekte vollständig in ihrer gesamten dreidimensionalen Ausdehnung abzubilden. Abb. 7 soll dies verdeutlichen. Berücksichtigt man, daß bei weit auseinanderliegenden Geometriemerkmalen, die erkannt werden sollen, auch nur eine entsprechend geringe Vergrößerung eingestellt werden kann, so kann davon ausgegangen werden, daß die Forderung nach einem hohen Meßbereich ausreichend erfüllt ist. Die hohe Schärfentiefe und die "Dreidimensionalität" der Abbildungen ist ein entscheidender Vorteil der Rasterelektronenmikroskopie gegenüber anderen Verfahren. Aus einer einzelnen Abbildung können quantitative Informationen über die dreidimensionale Geometrie jedoch nur in Spezialfällen gewonnen werden, etwa wenn senkrechte Strukturwände vorausgesetzt werden können. Im allgemeinen Fall werden mindestens zwei Aufnahmen aus verschiedenen Blickrichtungen erforderlich sein. Die Möglichkeiten zur Vermessung in drei Dimensionen mit Hilfe von Stereo-Aufnahmen werden in Kapitel 2.2 diskutiert.

Physikalisch bedingt durch die sehr viel kleinere Wellenlänge von Elektronen gegenüber sichtbarem Licht ist die Auflösung in der Elektronenmikroskopie viel besser als in der optischen Mikroskopie, beim Rasterelektronenmikroskop bis hinunter in den nm-Bereich. Dabei ist zu beachten, daß sich die Auflösung z.B. entlang einer Kante entsprechend ihrem Neigungswinkel zur Bildebene verschlechtert. Ein wesentlicher Faktor für die Begrenzung der Auflösung ist der Durchmesser des Primärelektronenstrahls.

Es wird nicht möglich sein, mit dem Rasterelektronenmikroskop Objektdetails in beliebig tiefen Strukturgräben abzubilden, da die emittierten Elektronen an den Wänden umstehender Strukturen abgefangen werden. Nach den bisherigen Beobachtungen wird die Grenze für das Aspekt-

verhältnis, bei dem solche Abbildungen noch möglich sind, je nach absoluter Strukturhöhe und Breite des Einschnitts etwa 10-20 betragen. Es gibt Bestrebungen, mit besonderen Objektivlinsen die Elektronenausbeute aus solchen Gräben und damit die Abbildungsmöglichkeiten zu erhöhen [55].

Die 3D-Abbildungsmöglichkeiten können mit geeigneten Probenstischen optimal ausgenutzt werden. In der Probenkammer eines Rasterelektronenmikroskops ist genügend Platz, um auch Proben von der Größe eines Substrats für Mikrostrukturen beliebig rotieren und stark verkippen zu können. Damit stehen eine große Zahl von möglichen Blickrichtungen zur Verfügung, so daß eine hohe Chance besteht, durch eine geeignete Wahl die gegenseitige Verdeckung von Strukturen oder Strukturteilen auszuschließen. Die Genauigkeit, mit der die Probenstische rotiert, verkippt und in seitlicher Richtung verfahren werden können, ist wesentlich sowohl für die Einstellung bestimmter Bildausschnitte als auch für die Meßgenauigkeiten. Häufig ist bei modernen Geräten auch Software zur Steuerung der Probenstische erhältlich.

Der Strom der einfallenden Elektronen und der Strom der Elektronen, die die Probe verlassen, ist unterschiedlich groß. Das bedeutet, es gibt einen Nettostrom in die Probe hinein oder aus ihr heraus. Dieser Strom muß durch die Probe abgeleitet werden, was allerdings nicht geschehen kann, wenn die Probe ein Isolator ist, so daß es in diesem Fall zu einer Aufladung der Probenoberfläche kommt. Zwei Effekte wirken sich dabei sehr nachteilig auf die Abbildungsqualität aus: der Primärelektronenstrahl wird aufgeweitet, was die Auflösung verschlechtert und die emittierten Elektronen werden durch Potentialunterschiede an der Probenoberfläche abgelenkt, woraus eine ungleichmäßige Bildhelligkeit und damit zusätzliche unerwünschte Kontraste sowie Verzerrungen der Abbildung resultieren. Methoden, um Aufladungserscheinungen zu vermeiden; sind eine geeignete Wahl der Beschleunigungsspannung in Abhängigkeit vom Material der Probe, die Beschichtung der Probe mit einem leitenden Material oder die Verwendung eines Antistatic-Mittels. Es kann davon ausgegangen werden, daß von nahezu jedem Material, wie es in der Mikromechanik verwendet wird, brauchbare Aufnahmen gemacht werden können.

Moderne Rasterelektronenmikroskope sind mit einem Rechner und Möglichkeiten für Aufnahme und Speicherung digitaler Bilder ausgestattet. Bereits heute sind Geräte mit einer Auflösung von 2048 x 2048 Bildpunkten verfügbar. Es ist auch möglich, eine Vielzahl von Mikroskop- und Tischfunktionen über geeignete Schnittstellen durch einen externen Rechner zu steuern. Inwieweit automatische Mikroskopfunktionen, wie z.B. Fokussierung und Astigmatismuskorrektur für die Zwecke eines automatischen Vermessungssystems genutzt werden können, muß noch ermittelt werden. Rotationen des Rasters, die bei einer Änderung des Arbeitsabstands auftreten, können korrigiert werden (Scan-Rotation).

Bezüglich der Meßzeiten bestehen einige limitierende Faktoren:

- Die Verfahzeiten für Probenstische bei Rotation und Kippung sind sehr hoch.
- Bilder können zwar auch mit TV-Geschwindigkeit aufgenommen werden, wobei die Bildqualität aber durch Hintergrundrauschen schlecht ist. Um eine höhere Bildqualität zu erreichen, muß mit langsameren Scangeschwindigkeiten gearbeitet werden.
- Die Probe befindet sich im Vakuum, wodurch die Handhabung des Mikroskops erschwert wird.

In einigen Betriebssituationen kann es zu irreversiblen Veränderungen der Probe kommen. Bei bestimmten Probenmaterialien dürfen entsprechende REM-Parameter nicht eingestellt werden.

Die konventionelle *Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)* ist ein direktabbildendes Verfahren. Die Funktionsweise ist analog zum Lichtmikroskop. Daneben gibt es auch Rastermikroskope, die in Transmission betrieben werden können. Hier befindet sich der Detektor unter der Probe. Die Abbildung von Objekten in Transmission ist nur bei geringer Probendicke möglich. Daher ist das Haupteinsatzgebiet von Transmissionselektronenmikroskopen die Untersuchung von biologischen Proben.

### Abschließende Bewertung

Radarverfahren, Raster-Tunnel- und Kraftmikroskopie sowie die Röntgenmikroskopie können bei einer 3D-Vermessung von Mikrostrukturen nicht eingesetzt werden, da sie entweder nur für völlig andere Meßbereiche geeignet sind oder kaum eine der gestellten Anforderungen erfüllen. Die meisten anderen optischen Verfahren und die akustische Mikroskopie weisen erhebliche Einschränkungen auf, vor allem durch zu kleine Meßbereiche und nahezu keine Möglichkeiten, die Probe zu verkippeln. Die konfokale Mikroskopie könnte als Echtzeitmethode mit einem in z verfahrbaren Probentisch bei der Durchführung einiger 3D-Aufgaben verwendet werden. Auch hier gibt es aber noch wesentliche Einschränkungen bei der Abbildung von Kanten, durch Probleme mit Reflexionen und Streuung bei transparenten Materialien wie PMMA sowie immer noch nicht zufriedenstellende Verkippungsmöglichkeiten.

Demgegenüber sind bei der Rasterelektronenmikroskopie im Sekundärelektronenbetrieb die wichtigsten Anforderungen zufriedenstellend erfüllt. Sie wird daher als bildgebendes Verfahren für das 3D-Vermessungssystem ausgewählt, trotz der mit der Anschaffung und dem Betrieb eines Rasterelektronenmikroskops verbundenen hohen Kosten. Rasterelektronenmikroskope werden gerade wegen ihrer hohen Schärfentiefe und auch wegen der hohen Auflösung in sehr vielen Bereichen eingesetzt. Dies gilt insbesondere auch für die Mikrotechnik und das LIGA-Verfahren. Hier werden bei der Prozeßentwicklung vielfältige qualitative Prüfungen von Strukturen aus allen Prozeßstufen anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen durchgeführt [56]. Gerade auch für geometrische 3D-Vermessungen wurden Methoden entwickelt, auf die zurückgegriffen werden kann (s. Kapitel 2.2). Obwohl moderne Mikroskope durch Schnittstellen für externe Rechner gut für eine Automatisierung ausgerüstet sind, sind für die vollautomatische Steuerung eines Rasterelektronenmikroskops zusätzliche Entwicklungsarbeiten nötig. Der Grund dafür ist die relativ komplizierte Bedienung, die sehr viel Erfahrung von einem menschlichen Operator erfordert und die in ein Konzept für ein automatisches Steuerungssystem einfließen muß. Positiv zu bewerten ist in diesem Zusammenhang, daß durch die langjährige Anwendung der Rasterelektronenmikroskopie in der LIGA-Technik sehr viel Wissen und Erfahrung für die Systementwicklung zur Verfügung steht. Für die automatische Muster- und Objekterkennung ist ein sehr hoher Entwicklungsaufwand anzusetzen, um die vielfältigen Aufgaben, die in diesem Bereich bei der 3D-Vermessung anfallen, zuverlässig erledigen zu können. Diese Problematik ist allgemein für den 3D-Bereich kennzeichnend und bedeutet gegenüber anderen Verfahren keinen Nachteil.

Die Rasterelektronenmikroskopie ist eine Methode zur Bildaufnahme, die Intensitätsbilder der zu vermessenden Mikrostrukturen liefert. Anhand solcher Bilder sind photogrammetrische Vermessungen möglich, z.B. anhand von Stereo-Aufnahmen. Das nächste Unterkapitel befaßt sich mit der *Stereophotogrammetrie* als Meßmethode.



## 2.2 Stereophotogrammetrie

REM-Aufnahmen eines Objekts sind zweidimensionale Projektionen auf die Bildebene. Aufgrund der hohen Schärfentiefe und der Kontrastunterschiede bei unterschiedlicher Orientierung der Objektoberflächen wird dem Betrachter einer REM-Aufnahme ein guter Eindruck vom dreidimensionalen Charakter einer Szene vermittelt. Trotz dieses Eindrucks sind Versuche, quantitative 3D-Informationen aus einer einzelnen Aufnahme zu erhalten, wenig sinnvoll und oft entsprechen selbst grobe Abschätzungen nicht der Wirklichkeit. Um eine vernünftige 3D-Vermessung durchführen zu können, sind stereoskopische Aufnahmen erforderlich, d.h. ein Stereobildpaar mit zwei unterschiedlichen Projektionen der Szene [57]. Aus jedem der beiden Bilder können die X- und Y-Positionen<sup>1</sup> von korrespondierenden Objektpunkten bestimmt werden, aus denen sich die Position in drei Dimensionen berechnen läßt.

Es kommen zwei Methoden in Betracht, um unterschiedliche Projektionen zu erreichen. Die erste Methode besteht darin, das Objekt nach der ersten Aufnahme zu verschieben. Im makroskopischen Bereich wird diese Methode in der Fernerkundung ebenfalls angewandt. Nach [58] erhält man bei 20-facher Vergrößerung einen für die stereoskopische Betrachtung genügend großen 3D-Effekt, wenn um die halbe Bildbreite verschoben wird. Bei stärkerer Vergrößerung ist die Methode nicht mehr nutzbar, weil bei Erhöhung der Vergrößerung auch stärker verschoben werden muß. Damit wird die beiden Bildern gemeinsame Überlappungsfläche, in der sich korrespondierende Objektteile befinden, kleiner, und schließlich liegt keine Überlappung mehr vor.

Die zweite Methode besteht darin, das Objekt zu verkippen. Sie kann in jedem Vergrößerungsbereich angewandt werden und die Überlappungsfläche entspricht einem Großteil des gesamten Bildfeldes. Da die Größe von geometrischen Merkmalen, die vermessen werden sollen, stark variieren kann, wird auch ein entsprechender Vergrößerungsbereich des Mikroskops ausgenutzt. Ferner kann generell, je größer der Überlappungsbereich ist, eine umso höhere Vergrößerung gewählt werden, was der Genauigkeit zugute kommt. Damit ist die Verkipfung die geeignete Methode, um 3D-Vermessungen an Mikrostrukturen durchzuführen. Der Kippwinkelunterschied zwischen den beiden Stereobildern wird im folgenden mit dem Begriff *Stereokippwinkel* ( $\Delta\theta$ ) bezeichnet. Als üblicherweise einzustellende Stereokippwinkel werden in der Literatur 5-20° genannt [58], wobei hier allerdings das Kriterium ist, daß ein menschlicher Betrachter bei stereoskopischer Betrachtung einen möglichst guten 3D-Eindruck bekommt. Auf die Wahl des Stereokippwinkels für die automatische Vermessung wird in Kapitel 3 eingegangen. In Anlehnung an die Verhältnisse beim menschlichen Sehapparat wird bei einer entsprechenden Kipprichtung und Lage der Kippachse beim kleineren Kippwinkel ( $\theta_l$ ) vom *linken* und beim größeren ( $\theta_r$ ) vom *rechten* Stereobild gesprochen. Beim 3D-Vermessungssystem werden die gleichen Bezeichnungen eingeführt, unabhängig von Kipprichtung und Lage der Achse, die von der Konfiguration des jeweiligen Probenstückes abhängen. Für die folgenden Ausführungen wird ein *Substratkoordinatensystem* ( $x_S, y_S, z_S$ ) und ein *Bildkoordinatensystem* ( $X, Y$ ) eingeführt. Kippung und Rotation erfolgen um die  $y_S$ -Achse bzw. um die  $z_S$ -Achse (Abb. 8).

Bei der Bestimmung von 3D-Positionen von Objektpunkten aus den 2D-Positionen im Bild wird ein Koordinatensystem benötigt, auf das diese 3D-Positionen bezogen werden können. In Abb. 9 sind drei Möglichkeiten dargestellt. Die Darstellung ist zweidimensional. Die y-Achse ver-

---

1. Großbuchstaben werden für 2D-Koordinaten in den Bildern verwendet, Kleinbuchstaben für 3D-Koordinaten in der realen Welt.

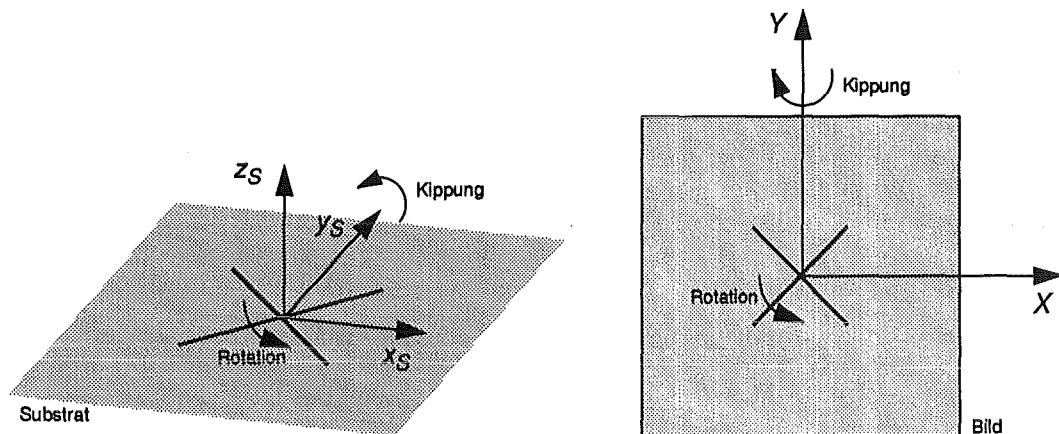


Abb. 8

Auf der linken Seite ist das Substrat mit dem Substratkoordinatensystem  $(x_S, y_S, z_S)$  dargestellt. Gekippt wird um die  $y_S$ -Achse, rotiert um die  $z_S$ -Achse in der jeweils angezeigten Richtung. Rechts ist schematisch ein Bild mit dem Bildkoordinatensystem  $(X, Y)$  dargestellt. In beiden Abbildungen ist ein Kreuz zur Orientierung eingezeichnet.

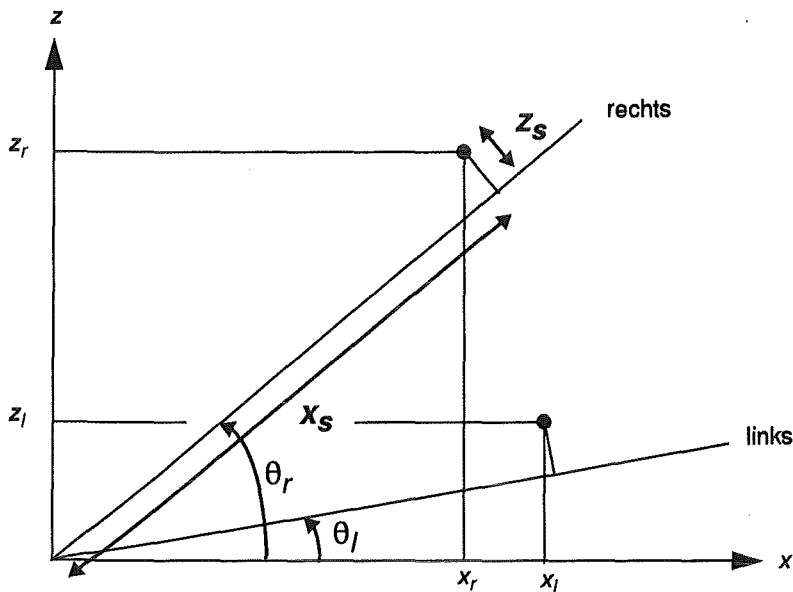


Abb. 9

Bezugssysteme für die Berechnung von 3D-Koordinaten (es sind nur  $x$  und  $z$  dargestellt):

Für das Vermessungssystem wird i. allg. das Substratkoordinatensystem  $(x_S, y_S, z_S)$  benutzt.

läuft senkrecht zur Abbildungsebene. Das Koordinatensystem  $(x, y, z)$  entspricht dem Substratkoordinatensystem bei unverkipptem Substrat. In diesem Koordinatensystem können die Koordinaten  $(x_l, y_l, z_l)$  bzw.  $(x_r, y_r, z_r)$  angegeben werden, die sich auf die Lage eines Objektpunktes beim kleineren Kippwinkel (links) bzw. größeren Kippwinkel (rechts) beziehen. Eine weitere Möglichkeit ist die Angabe in Substratkoordinaten  $(x_S, y_S, z_S)$ . Diese Konvention wird dann benutzt, wenn die abzubildenden Objekte eine fest vorgegebene Position und Orientierung bezüglich des Substrats einnehmen [58]. Die geometrische Beschreibung von Mikrostrukturen erfolgt in Substratkoordinaten, weshalb auch für die Vermessung i. allg. das Substratkoordinatensystem verwendet wird.

Die Projektion dreidimensionaler Objekte auf die Bildebene im Rasterelektronenmikroskop ist eine *Zentralprojektion* (s. Abb. 10). Bei der Berechnung von 3D-Koordinaten kann bei hohen Vergrößerungen von einer Parallelprojektion ausgegangen werden, da in diesem Fall der Winkel, den der Elektronenstrahl beim Rastern mit der Richtung des unabgelenkten Strahls bildet, vernachlässigbar klein wird und sich nicht mehr entscheidend auf die Genauigkeit der Berechnungen auswirkt. Bei der Vermessung von Mikrostrukturen treten auch geringe Vergrößerungen auf, so daß hier generell die komplexeren Zentralprojektionsgleichungen benutzt werden [57]. Diese Gleichungen für  $x$ ,  $y$  und  $z$  in Substratkoordinaten sind:

$$Mx_s = MD \frac{X_r (X_l \cos \theta_l - MD \sin \theta_l) - X_l (X_r \cos \theta_r - MD \sin \theta_r)}{((MD)^2 + X_l X_r) \sin(\Delta\theta) + MD (X_l - X_r) \cos(\Delta\theta)}$$

$$Mz_s = MD \frac{X_l (X_r \sin \theta_r + MD \cos \theta_r) - X_r (X_l \sin \theta_l + MD \cos \theta_l)}{((MD)^2 + X_l X_r) \sin(\Delta\theta) + MD (X_l - X_r) \cos(\Delta\theta)} \quad (2.1)$$

$$My_s = \frac{Y_l}{MD} (MD - Mx_s \sin \theta_l - Mz_s \cos \theta_l)$$

$X_l, Y_l$ :	Koordinaten im linken Bild
$X_r$ :	Koordinate im rechten Bild
$x_s, y_s, z_s$ :	3D-Substratkoordinaten
$\theta_l, \theta_r$ :	Kippwinkel links und rechts
$\Delta\theta$ :	Stereokippwinkel ( $\theta_r - \theta_l$ )
$M$ :	Vergrößerung
$D$ :	Abstand vom Projektionszentrum zum Mittelpunkt des Rasters auf der Substratoberfläche

Die Größe  $D$  entspricht dem Arbeitsabstand plus einem konstanten Abstand zwischen Projektionszentrum und Basis der letzten Linse, der experimentell ermittelt werden muß ("principal distance") [59]. Die Vergrößerung  $M$  ist bezogen auf die  $x, y$ -Ebene. Perspektivische Verzerrungen für Objektpositionen mit  $z \neq 0$  werden automatisch korrigiert. Falls anstelle von Absolutpositionen in Substratkoordinaten nur Relativpositionen bestimmt werden sollen, wie etwa bei einer Distanzmessung, kann in (2.1) auch 0 anstelle von  $\theta_l$  und  $\Delta\theta$  anstelle von  $\theta_r$  eingesetzt werden. Die Gleichungen (2.1) gehen dann in die Zentralprojektionsgleichungen für das Bezugssystem  $(x_l, y_l, z_l)$  (Abb. 9) über.

Die Stereophotogrammetrie, also die Aufnahme von Stereobildpaaren und die Projektionsrechnungen zur Bestimmung von 3-D-Positionen von Objektpunkten, bildet zusammen mit der Rasterelektronenmikroskopie als Bildaufnahmeverfahren das Meßverfahren, das dem 3D-Vermessungssystem zugrunde gelegt wird. Photogrammetrische Methoden zur 3D-Rekonstruktion anhand elektronenmikroskopischer Aufnahmen sind weit verbreitet. Neben Anwendungen in Biologie [60] und Materialwissenschaften [61] werden sie auch in der Mikrostrukturtechnik zur Erledigung spezieller Vermessungsaufgaben eingesetzt. Ein Beispiel ist die Bestimmung von Winkeln zwischen den Flächen V-förmiger Gruben, wie sie durch anisotropes Ätzen von Silizium hergestellt werden [62][63].

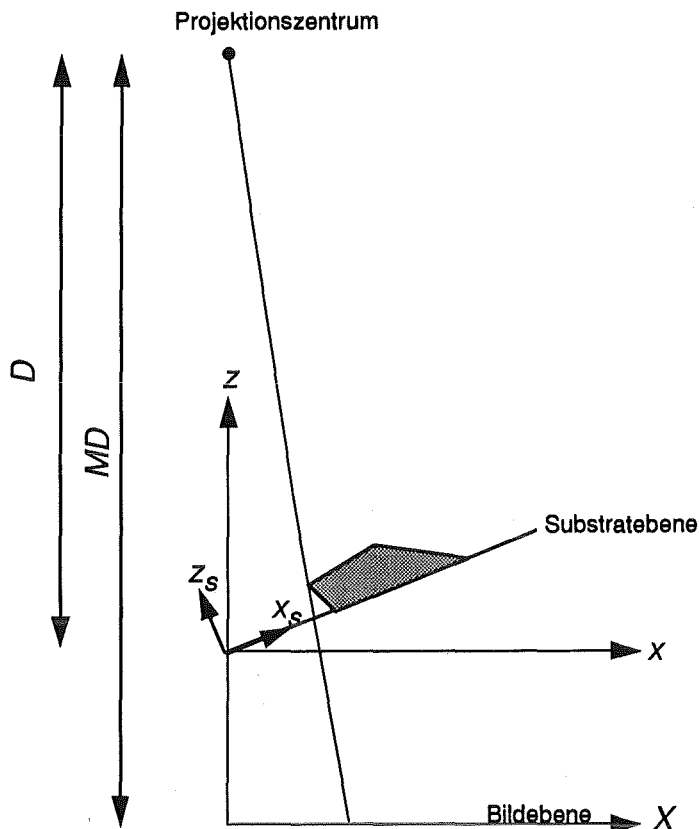


Abb. 10  
 Zentralprojektion (Berechnung von  
 3D-Koordinaten im Substratkoordinatensystem  $(x_s, y_s, z_s)$ ):  
 M: Vergrößerung  
 D: principal distance

### 2.3 Digitale Bildanalyse

Die Erkennung von geometrischen Strukturmerkmalen (z.B. die Detektion von Strukturecken) ist bei einem interaktiven Vermessungssystem Aufgabe des Benutzers. Für die Automatisierung des Systems ist der Einsatz digitaler Bildverarbeitung vorgesehen. Erkennungsaufgaben werden in die Systemkonzeption so eingebunden, daß sie ausgehend von einem rein interaktiven System schrittweise automatisiert werden können. Daneben werden Bildverarbeitungsmethoden auch bei der automatischen Steuerung des Mikroskops erforderlich sein (s. auch Kapitel 3.8).

Gemäß den Anforderungen an das Bildaufnahmeverfahren (Kapitel 2.1) liegen die REM-Aufnahmen als digitalisierte Bilder vor, d.h. das Bild besteht aus einem Raster von einzelnen Bildpunkten (Pixel), denen ein ganzzahliger Grauwert zugeordnet ist. Der Wertebereich der Grauwerte richtet sich danach, wieviele Bits für die Codierung zur Verfügung stehen und reicht bei  $k$  Bit von 0 bis  $2^k - 1$ . Üblicherweise wird mit 8 Bit codiert, wobei der Wert 0 für schwarz, 255 für weiß steht. Das Pixelraster besteht im allgemeinen Fall aus  $n$  Zeilen und  $m$  Spalten. In den Beispielen dieser Arbeit wird von quadratischen Bildern mit  $n = m$  ausgegangen. Die meisten Rasterelektronenmikroskope liefern digitalisierte Bilder mit  $n = 1024$ . Je größer die Pixelzahl pro Bildzeile und -spalte ist, umso größer ist die Auflösung und damit die erreichbare Meßgenauigkeit.

Aufgabe der digitalen Bildanalyse bei der Durchführung von Vermessungen in Stereobildpaaren ist es, im dreidimensionalen Raum vorhandene reale Objekte im zweidimensionalen Bild zu

erkennen bzw. zu identifizieren (*Objekterkennung*). Es handelt sich dabei um dreidimensionale *Körper* (Mikrostrukturen oder Strukturteile), deren *Oberflächen, Kanten* oder *Ecken*. Diese Arten von Objekten werden *geometrische Elemente* genannt (zur genauen Definition dieser Begriffe s. Kapitel 3.3).

Die für eine Objekterkennung notwendigen Schritte sind:

1. **Bildvorverarbeitung:** In diesen Bereich gehören Methoden zur Verbesserung der Bildqualität, Speicherung der Bilddaten in einem bestimmten Format und digitale Filterung [64].
2. **Mustererkennung:** Im Bild wird nach einem zweidimensionalen Muster gesucht. Die Merkmale der Muster beschreiben ein zu erkennendes Objekt. Die Erkennung eines Objektes im 3D-Raum besteht dann aus einer Reihe von Mustererkennungsaufgaben in der 2D-Abbildung.

Die Methoden zur Erkennung von Geometrieelementen sind grundlegende *Operationen* bei der Durchführung einer Vermessung. Ausgangspunkt für die Durchführung von Erkennungsoperationen sind die Konturen eines Objektes, d.h. seine realen Kanten oder bei gekrümmten Oberflächen Horizontlinien, die durch die Krümmung senkrecht zur Bildebene entstehen. Objektkonturen können mit Bildverarbeitungsmethoden aus den Bilddaten extrahiert werden. Grundlagen für diese Kantenextraktionsmethoden sind die Grauwertunterschiede an den Konturen. Verschiedene Kantenmodelle beschreiben die Stufen in der Grauwertfunktion, die an Objektkonturen auftreten. Daraus lassen sich Kantenoperatoren ableiten, die das diskrete Analogon zur stetigen Grauwertfunktion eines Kantenmodells darstellen. Einfache Operatoren sind Differenzenoperatoren, der Sobel-Operator und der Laplaceoperator [64]. Die Extraktion von Objektkonturen kann zur Bildvorverarbeitung gerechnet werden. Im einfachsten Fall erhält man ein binäres Kantenbild, für dessen Bildpunkte nur noch zwei verschiedene Grauwertstufen verwendet werden.

Im nächsten Schritt auf dem Weg zur Objekterkennung können Ecken und Kanten unter Einsatz von Mustererkennungsmethoden identifiziert werden. Die Merkmale des Musters müssen das gesuchte Geometrieelement eindeutig beschreiben. Abb. 11<sup>1</sup> zeigt als Beispiel eine Pyramide (a), für die zunächst die Kantenextraktion durchgeführt wurde (b). Der Ausschnitt rechts oben zeigt beispielhaft ein Muster für die Pyramidenspitze, das in diesem Fall einfach eine Berechnung der Umgebung der gesuchten Ecke im Kantenbild darstellt. Die Erzeugung eines solchen Musters setzt die Kenntnis der Geometrie sowie des Blickwinkels und der Vergrößerung voraus. Im Falle der 3D-Vermessung von Mikrostrukturen steht dieses Vorwissen zur Verfügung, so daß die hier skizzierte Vorgehensweise eine Möglichkeit darstellt, die Erkennung von Ecken zu realisieren. Die eigentliche Objekterkennung besteht im Vergleich der Bilddaten des Kantenbildes mit dem Muster. Das Ergebnis sind die Koordinaten des Bildpunktes, der die beste Übereinstimmung mit dem vorgelegten Muster aufweist.

Für die Erkennung von Kanten kann von den Ecken als Anfangs- und Endpunkte einer Kante ausgegangen werden, wobei die dazwischenliegenden Kantenpixel durch Konturverfolgungsalgorithmen ermittelt werden. Als Muster kann auch hier der theoretische Kantenverlauf vorgegeben werden. Das Ergebnis einer Erkennungsoperation bei Kanten ist eine Pixelliste, die alle

---

1. Alle synthetischen Bilder dreidimensionaler Strukturen in dieser Arbeit wurden mit dem Strahlverfolgungsprogramm mtv-Raytracer [65] erzeugt.

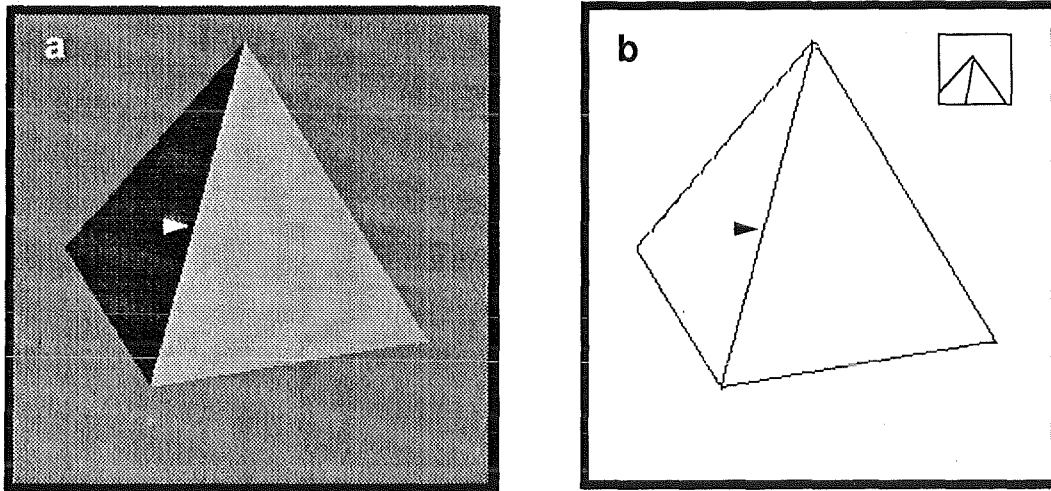


Abb. 11  
 Objekterkennung (prinzipielle Vorgehensweise):  
 Aus dem synthetischen Originalbild a werden die Kanten extrahiert (Bildvorverarbeitungsschritt). Im daraus resultierenden binären Kantenbild b wird die Spitze der Pyramide als zu erkennendes Objekt identifiziert, indem etwa das rechts oben abgebildete Muster durch Vergleich mit den Daten des Kantenbildes erkannt wird. Das Ergebnis besteht aus den Koordinaten des Bildpunktes, an dem sich die Pyramidenspitze befindet.

Bildpunkte, die zur Kante gehören, enthält. Dieses Prinzip wurde auch beim System COSMOS-2D angewendet [23].

Um die Aufgabe für die Erkennungsoperationen bei Oberflächen und Körpern allgemein zu charakterisieren, wird festgelegt, daß diese höherdimensionalen geometrischen Elemente identifiziert werden, indem sämtliche Konturen der Elemente im Bild erkannt werden, die nicht durch den Körper selbst oder (bei Oberflächen) durch den Körper, zu dem die Oberfläche gehört, verdeckt werden. Bei Oberflächen beschreiben die Konturen i. allg. geschlossene Berandungen der Abbildung der Fläche. Bei Körpern gehören außer der äußeren Berandung auch dazwischenliegende Kanten zu den zu erkennenden Konturen (Pfeil in Abb. 11a). Das Ergebnis von Erkennungsoperationen bei Oberflächen und Körpern ist also die Summe der Ergebnisse einzelner Kantenerkennungen und damit eine Liste von Pixellisten.

Hierzu sind einige wichtige Bemerkungen notwendig:

1. Erkennungsoperationen sind hierarchisch angeordnet: Jede Kantenerkennung (außer bei geschlossenen, glatten Kanten wie z.B. Kreisen) basiert auf Eckenerkennungsoperationen. Die Erkennung von Oberflächen und Körpern setzt ihrerseits die Erkennung von Kanten voraus.
2. Nur die Erkennungsoperationen für Ecken und Kanten operieren direkt auf den Bilddaten. Eine Erkennungsoperation für höherdimensionale Geometrielemente ist lediglich eine Zusammenfassung von Kantenerkennungen.

3. Die hier skizzierte Vorgehensweise bei der Objekterkennung setzt saubere Kantenbilder voraus. Bei dem synthetischen Bild aus Abb. 11 war ein einfacher Gradientenfilter für die Kantenextraktion ausreichend. Alle vier im Bild sichtbaren Strukturecken konnten automatisch detektiert werden. Die Kantenmodelle, die einfachen Kantenoperatoren zugrunde liegen, sind für die in realen REM-Aufnahmen auftretenden Strukturkanten jedoch nicht ausreichend. Kanten werden nicht vollständig extrahiert und es treten zusätzliche Konturen auf, die nicht den Objektkonturen entsprechen. Um eine automatische Kantendetektion zu realisieren, werden derzeit die Einsatzmöglichkeiten neuronaler Netzwerkarchitekturen untersucht [66]. Ferner existieren eine Fülle hochentwickelter klassischer Algorithmen zur Kantenextraktion, deren Anwendbarkeit durch umfangreiche Testreihen geprüft werden muß. Es werden auch Möglichkeiten zur Mustererkennung direkt im Originalbild diskutiert.

Die Aufgabe der Objekterkennung ist nun als Folge von Operationen zur Erkennung von Mustern beschrieben und kann in dieser Form in das Konzept für den Ablauf von Vermessungen einbezogen werden (s. Kapitel 3). Diese Operationen können zunächst interaktiv durch den Benutzer ausgeführt werden. Die Entwicklungsarbeiten zur Automatisierung von Kantenextraktion und Mustererkennung können innerhalb eines abgeschlossenen Bezugsrahmens weiterverfolgt werden.

## 2.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen hat sich gezeigt, daß 3D-Techniken (Abbildung von dreidimensionalen Objekten, Rekonstruktion der 3D-Geometrie und Vermessungen) in zwei Bereichen weit entwickelt sind. Auf der einen Seite sind es makroskopische Objekte, bei denen die Geometrie mit Punktabstandssensoren (z.B. nach Radarverfahren oder nach dem Prinzip der aktiven Triangulation) mit z.T. beachtlicher Auflösung rekonstruiert werden kann. Eine umfangreiche Übersicht über solche Systeme findet sich in [44]. Auf der anderen Seite steht die Aufzeichnung mikroskopischer Profilvariationen von Strukturoberflächen, wofür interferometrische Verfahren (insbesondere Heterodyn-Techniken) und Fokussierverfahren eine geeignete Grundlage entsprechender Systeme bilden (s. auch Kapitel 2.1). Die Topographie der in diesem Bereich betrachteten Objekte ist eher unregelmäßig und die Profilhöhen variieren allmählich (z.B. Mikrorauhigkeit).

Die Produkte der Mikromechanik liegen von ihrer Größe her im mikroskopischen Bereich. Details dieser Strukturen erfordern z. T. höhere Auflösungen als die, welche mit den auf makroskopische Objekte ausgelegten 3D-Techniken erreichbar sind. Ferner handelt es sich bei mikromechanischen Objekten um regelmäßig geformte Körper, deren Geometrie mathematisch beschreibbar ist. Auf die Notwendigkeit der Erkennung von Ecken und Kanten wurde bereits hingewiesen. Systeme zur Aufzeichnung mikroskopischer Profilvariationen sind hier nur eingeschränkt nutzbar.

Dieses Kapitel hat gezeigt, welche bereits existierende Techniken für die 3D-Vermessung genutzt werden können. Die Integration dieser Techniken zu einem System, das letztendlich automatisch arbeitet, wird im folgenden noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Für die Abbildung der Mikrostrukturen ist die Rasterelektronenmikroskopie die einzige Methode, die ein vollständiges Erfassen einzelner Objekte ermöglicht. Sie ist bereits heute ein unver-

zichtbares Hilfsmittel der Mikrotechnik, um Strukturen abzubilden und so ihre Qualität zu beurteilen.

Die 3D-Rekonstruktion mit Hilfe photogrammetrischer Methoden anhand von Stereoaufnahmen wurde bereits in vielen technischen und wissenschaftlichen Bereichen eingesetzt (vgl. auch Kapitel 2.2). Schon sehr früh wurde hier die Notwendigkeit erkannt, interaktive Systeme zu entwickeln, bei denen der Anwender durch den Einsatz von Computern unterstützt wird [67]. Bei diesen Systemen steht jeweils eine bestimmte Anwendung (bzw. ein bestimmter Vermessungswunsch) im Vordergrund. So werden etwa Höhendifferenzen gemessen oder wie in [62] die Winkel zwischen ebenen Flächen. Die rasche Entwicklung in der Mikrotechnik mit einer stetig wachsenden Anzahl geometrischer Formen erfordert es nun, diese Ansätze in einem einzigen System zu integrieren. Dabei muß die Interaktion des Benutzers in allen Systemteilen auf ein Minimum beschränkt werden, wenn es darum geht, den Einsatz des Systems auch in einer industriellen Fertigungslinie zu ermöglichen. Die Forderungen, unterschiedliche Vermessungen an beliebigen geometrischen Formen in den Rahmen eines einzigen Gesamtsystems einzubetten und gleichzeitig einen möglichst vollautomatischen Ablauf der Systemfunktionen zu realisieren, unterscheidet die in dieser Arbeit erstellte Konzeption von bisherigen Ansätzen.

Um von den Stereo-Aufnahmen zu einer Rekonstruktion der Objekte zu gelangen, ist eine Objekterkennung durchzuführen. Dieser Bereich erfordert in der Regel ein sehr hohes Maß an Benutzer-Interaktion. In Kapitel 2.3 wurde der Einsatz von digitaler Bildanalyse zur Erfüllung dieser Aufgabe vorgeschlagen. Im Unterschied zu den meisten anderen Anwendungen photogrammetrischer Methoden ist die Sollgeometrie der Strukturen bekannt, so daß hier Vorwissen für die automatische Objekterkennung vorhanden ist.

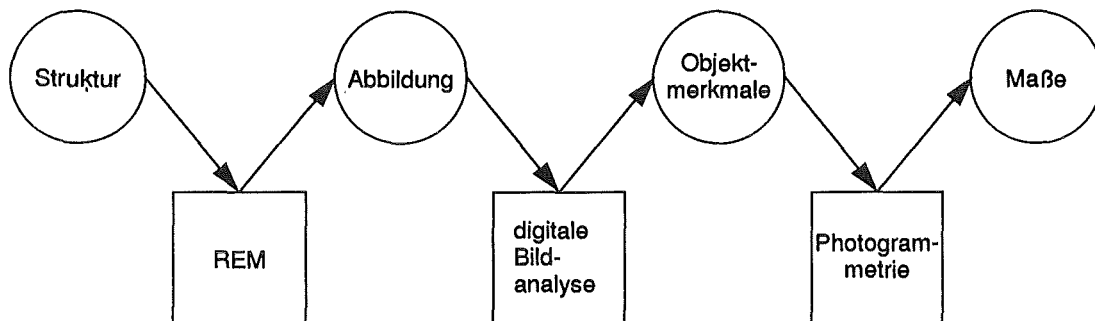


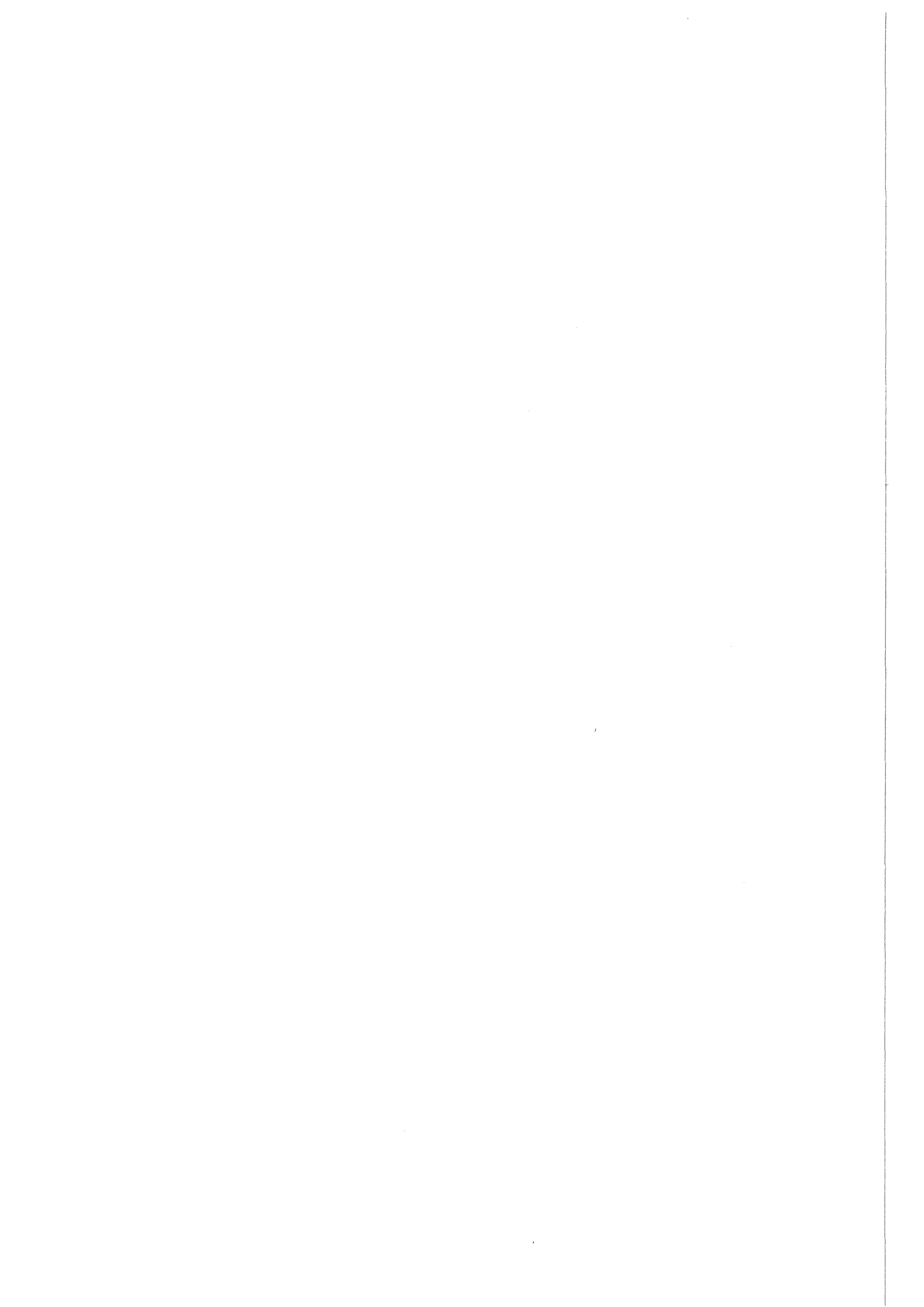
Abb. 12

*Schematische Darstellung des Ablaufs einer Vermessung:*

*Eine reale Struktur wird im Mikroskop abgebildet, relevante Objektmerkmale werden mittels digitaler Bildanalyse erkannt und photogrammetrisch die geforderten Maße der Struktur bestimmt. Anschließend kann eine Beurteilung der Struktur aufgrund der gemessenen Werte erfolgen.*

Abb. 12 stellt schematisch den Ablauf einer Vermessung auf den hier erarbeiteten Grundlagen dar, wobei vorausgesetzt wird, daß auch eine automatische Objekterkennung mit digitaler Bildanalyse realisiert wird. Die drei Schritte Bildaufnahme (REM), Objekterkennung (digitale Bildanalyse oder alternativ auch interaktiv durch den Benutzer) und 3D-Rekonstruktion (Photogrammetrie) erfolgen nacheinander. Es wird auch deutlich, daß im zweiten und dritten Schritt nicht vollständige Strukturen erkannt und rekonstruiert werden, sondern nur bestimmte Merkmale, um die geforderten Maße zu bestimmen.





### 3 Systemkonzeption

Das in Abb. 12 dargestellte Schema für die Durchführung einer Vermessung gilt unabhängig von der Art der Meßaufgabe und von der Geometrie der betroffenen Strukturen. Unter der Voraussetzung, daß eine automatische Objekterkennung mittels digitaler Bildanalyse realisiert wird, ist der gesamte Ablauf vollautomatisch durchführbar. Im Falle einer interaktiven Objekterkennung durch den Benutzer erfolgen dessen Aktionen nach Aufforderung durch das System, so daß auch hier die Steuerung des Vermessungsablaufs Aufgabe des Computers ist. Dabei wird deutlich, daß das in Abb. 12 gezeigte Schema zwar den zentralen Kern des Vermessungssystems beschreibt, das Gesamtsystem aber einen größeren Umfang haben muß. Die Durchführung von Vermessungen ist eine sequentielle Bearbeitung von Steuerungsbefehlen. Die einzige Entscheidung, die der Benutzer zu treffen hat, ist, was gemessen werden soll; wie diese Aufgaben erledigt werden, wird von der Systemsoftware festgelegt. Diese automatische Meßablaufsplanung erzeugt Steuerungsbefehle auf der Grundlage von Wissen über die zu vermessende Mikrostruktur, insbesondere ihre Geometrie, die gestellte Meßaufgabe und das Mikroskop. Die in diesem Kapitel vorgestellte Systemkonzeption befaßt sich hauptsächlich mit der Meßablaufsplanung. Die eigentliche Vermessung rückt in den Hintergrund, da zum Zeitpunkt ihrer Durchführung keine wesentlichen intelligenten Entscheidungen des Systems erforderlich sind. Nach einer groben Charakterisierung der vorgesehenen Systemleistungen und einer Übersicht über das gesamte System werden Modelle für die Beschreibung der dreidimensionalen Strukturgeometrie und der Meßaufgaben entwickelt (Kapitel 3.3 und 3.4). Einer Beschreibung der Konzeption der Meßablaufsplanung in Kapitel 3.6 ist eine ausführliche Begründung für ihre Notwendigkeit vorangestellt. Die übrigen Abschnitte dieses Kapitels befaßen sich mit weiteren Teilen des Gesamtsystems.

#### 3.1 Leistungsumfang des Vermessungssystems

Der Komplexitätsgrad des hier entwickelten Vermessungssystems ist sehr groß. Die Ursache dafür ist, daß dem Benutzer sämtliche Entscheidungen über den Ablauf einer (beliebigen) Vermessung abgenommen werden sollen. Dabei müssen etwa gegenseitige Verdeckungen von Strukturen bzw. Strukturteilen und vorgegebene Genauigkeitsanforderungen berücksichtigt werden und es muß für die Objekterkennung, gleichgültig, ob sie automatisch oder interaktiv durchgeführt wird, eine Beschreibung der zu identifizierenden Merkmale erstellt werden. Konzeption und Realisierung eines solchen Systems können daher nur in mehreren Iterationsschritten erfolgen. Viele Möglichkeiten zur Steigerung der Systemleistungen ergeben sich erst im Verlauf der Entwicklungsarbeiten oder werden erst bei zukünftigen Systemversionen berücksichtigt. Dennoch ist der geplante Leistungsumfang bei Beginn der Entwicklung ausreichend zu spezifizieren. Im folgenden werden die Systemleistungen, die für das System vorgesehen sind, unter verschiedenen Aspekten betrachtet.

#### Probe

Eine *Probe* im Sinne des 3-D-Vermessungssystems ist ein ebenes Substrat, auf dem sich mikro-mechanische Strukturen befinden. Die Probe muß auf dem Probentisch des Mikroskops mon-

tiert werden können und ein Verkippen der Probe um mindestens 30 Grad sollte möglich sein. Dadurch ergeben sich je nach Probenstück und Größe der Probenkammer Einschränkungen für die Substratabmessungen.

## Mikroskop

Die erste Systemversion wird an einem bestimmten Gerätetyp implementiert. Das System soll schließlich an verschiedenen Rasterelektronenmikroskopen eingesetzt werden können. Dies ist auf der obersten Konzeptionsebene zu berücksichtigen.

## Geometrie der Mikrostrukturen

Mögliche Geometrieformen sind durch den jeweiligen Stand der Technik bei den Herstellungsverfahren festgelegt. Da dieser Stand jedoch nicht festgeschrieben ist, wird davon ausgegangen, daß die Geometrie der Mikrostrukturen beliebig ist. Der Leistungsumfang des Systems hinsichtlich verarbeitbarer Geometrieformen muß variabel sein. Insbesondere soll eine Erweiterung bei der Einführung neuer Geometrieformen nur bestimmte Systemteile betreffen.

## Meßaufträge

Es sind beliebige Vermessungsaufgaben denkbar, die als *Meßaufträge* an das System gestellt werden. Insbesondere bei der Einführung neuer Geometrieformen ergeben sich auch neue Vermessungswünsche aufgrund neu auftretender geometrischer Parameter. Ferner kommen auch Aufträge zur Bestimmung von qualitativen Merkmalen in Betracht. Der Leistungsumfang soll auch hier erweiterbar sein, ohne daß das Grundsystem verändert werden muß. Für einen Meßauftrag kann optional eine Sollgenauigkeit angegeben werden, mit der die Meßgröße bestimmt werden soll.

## Grundsystem

Unter dem Begriff *Grundsystem* werden diejenigen Teile der Systemkonzeption verstanden, die unabhängig von den Vermessungsaufgaben und den zu verarbeitenden Geometrieformen sind. Es wird festgelegt, daß jeder Meßauftrag in einem Stereobildpaar oder, falls keine dreidimensionalen Geometrieparameter zu bestimmen sind, in einem Einzelbild erledigt wird. Es darf keine verbotenen Meßaufträge geben; jeder Meßauftrag, gleichgültig welcher Art und auf welche Strukturteile er sich bezieht, muß dem System angegeben werden können. Es muß in der Lage sein festzustellen, wenn ein Meßauftrag nicht durchführbar ist, ihn entsprechend zu kennzeichnen und von der weiteren Verarbeitung auszuschließen. Ein Meßauftrag soll, falls er prinzipiell durchführbar ist, mit einer Genauigkeit durchgeführt werden, die größer oder gleich der vorgegebenen Sollgenauigkeit ist oder, falls dies nicht möglich ist, mit maximaler Genauigkeit und entsprechender Nachricht.

## Automatisierung

Es gibt zwei Bereiche des Vermessungssystems, bei denen ein hoher Entwicklungsaufwand für einen automatischen Ablauf der Systemfunktionen angesetzt werden muß. Zum einen ist dies

die Steuerung des Rasterelektronenmikroskops, die unter den Voraussetzungen einer hohen Positioniergenauigkeit des Probenstisches und einer ausreichenden Bildqualität relativ kompliziert ist, zum anderen ist eine zuverlässige Mustererkennung in REM-Aufnahmen nicht mit einfachen Bildverarbeitungsmethoden durchzuführen. Bei der Entwicklung der ersten Systemversion sind daher entsprechende Systemfunktionen so zu implementieren, daß die zugehörigen Aufgaben interaktiv vom Benutzer erledigt werden können. Ausgehend von diesem interaktiven System muß es möglich sein, die Mustererkennung und komplexere REM-Steuerungsfunktionen schrittweise zu automatisieren, ohne die Systemkonzeption zu ändern.

Es ist eine charakteristische Eigenschaft des Systems, daß der Leistungsumfang hinsichtlich Geometrie und Meßaufträgen theoretisch unbegrenzt ist. Da neue Geometrieformen und Meßaufträge hinzugefügt werden können, kann mit Angaben über verarbeitbare Geometrieformen und Aufträge nur der jeweilige Stand der Implementierung grob charakterisiert werden. Beschränkungen im Leistungsumfang sind im wesentlichen dadurch gegeben, daß ein Auftrag in einem Stereobildpaar durchgeführt werden muß. Sie decken sich nicht notwendigerweise mit bestimmten geometrischen Formen oder bestimmten Arten von Meßaufträgen.

### 3.2 Architektur des Gesamtsystems

Die Architektur des gesamten Vermessungssystems ist in Abb. 13 dargestellt [68]. Eine externe Datenbank bzw. Dateischnittstelle liefert Eingabedaten, die sich grob in drei Kategorien unterteilen lassen:

1. Meßaufträge
2. Beschreibung der Probe (Geometrie und Probenparameter)
3. Beschreibung des Rasterelektronenmikroskops

Ferner nimmt die externe Schnittstelle die Ergebnisse des Vermessungssystems auf. Die drei Software-Hauptkomponenten des Systems sind die *Vorbereitung*, die *Vermessung* und die *Auswertung*.

Die Vorbereitung ist diejenige Systemkomponente, die eine automatische Planung des Meßablaufs durchführt. Sie liefert für die Vermessung eine *Meßbeschreibung*, in der sämtliche einzustellenden REM-Parameter enthalten sind. Ferner geht aus der Meßbeschreibung auch die *Operationsfolge* für die Einstellung dieser Parameter, die Bildakquisition, die Mustererkennung und die Berechnung der Meßergebnisse hervor. Die Vorbereitung muß für beliebige Aufträge in Abhängigkeit von der jeweiligen Strukturgeometrie eine Möglichkeit zur Durchführung eines Auftrags bereitstellen. Die Konzeption dieser Systemkomponente in Verbindung mit einer geeigneten Strukturierung der Eingabedaten ist daher von besonderer Wichtigkeit bei der Entwicklung des gesamten Systems. Bei der Vermessung wird die vorgegebene Operationsfolge Schritt für Schritt abgearbeitet, wodurch sich auf der obersten Beschreibungsebene ein sehr einfaches Konzept für diese Systemkomponente ergibt. Hier werden gewissermaßen die Befehle der Vorbereitung befolgt. Die *Meßergebnisse* enthalten die Daten der Meßaufträge mit den Resultaten der Vermessung. Sie bilden die Schnittstelle zur Systemkomponente Auswertung. Im Prinzip sind die Aufgaben des Vermessungssystems mit der Ermittlung der Meßergebnisse erfüllt. Das umfangreiche Datenmaterial erfordert jedoch eine benutzergerechte Darstellung. Zu-

dem müssen, um das Vermessungssystem effektiv einsetzen zu können, die reinen Meßergebnisse weiterverarbeitet und interpretiert werden können. Diesem Zweck dient die Auswertung.

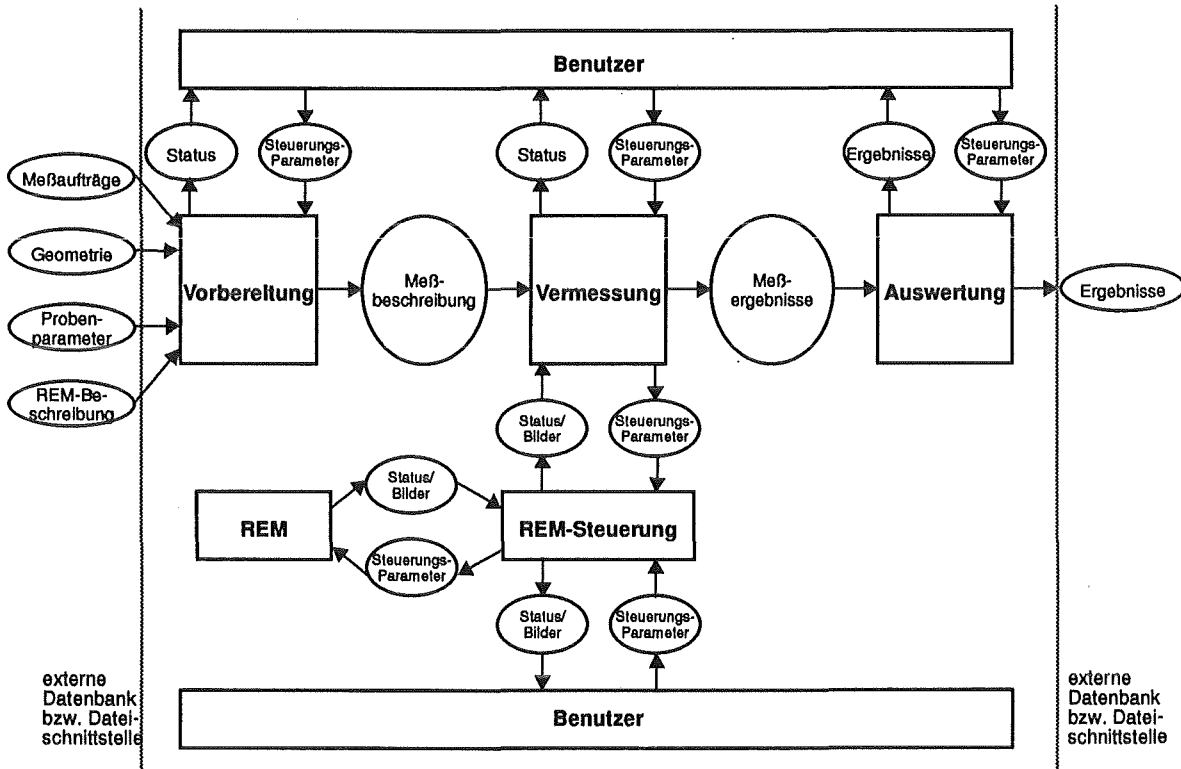


Abb. 13

Architektur des 3D-Vermessungssystems:

Die Hauptkomponenten des Systems sind die Vorbereitung, die Vermessung und die Auswertung. Eine weitere Softwarekomponente dient zur Steuerung des Rasterelektronenmikroskops (REM). Jede Softwarekomponente erhält eine Benutzerschnittstelle. Wichtigste Eingabedaten sind Geometriedaten und Meßaufträge.

Vorbereitung, Vermessung und Auswertung können zeitlich voneinander getrennt durchgeführt werden. Die Daten der Meßbeschreibung und die Meßergebnisse werden in geeigneten Formaten zwischengespeichert. Die Möglichkeit zur zeitlichen Trennung von Vorbereitung und Vermessung ist wichtig, da bei der Vorbereitung umfangreiche Berechnungen durchzuführen sind, die die Geschwindigkeit der Vermessung herabsetzen würden. Ferner muß für gleichartige Proben die Vorbereitung nur ein einziges Mal durchgeführt werden. Die Auswertung als interaktives Teilsystem ist auf die vorherige Durchführung aller Meßaufträge einer Meßreihe angewiesen.

Eine weitere Komponente des Vermessungssystems ist die *REM-Steuerung*. Diese Komponente enthält Funktionen für die Bildakquisition, die Einstellung von Mikroskop- und Probenparameter, das Auslesen von aktuellen Parameterwerten und das Veranlassen von automatischen REM-Funktionen. Über eine Schnittstelle zwischen Vermessung und REM-Steuerung werden Steuerungsparameter von der Vermessung übergeben und Bilddaten sowie Statusinformationen übernommen.

Jede der drei Hauptkomponenten erhält eine Benutzerschnittstelle, wobei der Umfang dieser Schnittstellen bei der Vorbereitung und der Vermessung mit dem Grad der Systemautomatisierung abnimmt, während er bei der Auswertung durch den Funktionalitätsumfang dieser Komponente bestimmt wird. Eine zusätzliche Benutzerschnittstelle ist zur REM-Steuerung vorgesehen. Auch der Umfang dieser Schnittstelle wird mit steigender Automatisierung abnehmen. Dabei ist es das Ziel, alle REM-Steuerungsfunktionen, die während der eigentlichen Durchführung von Vermessungen anfallen, zu automatisieren. Zu Beginn und am Ende einer Meßreihe werden jedoch auch bei einem vollautomatisierten System einige Aktionen vom Benutzer manuell durchgeführt werden müssen. Hierzu ist eine Kommunikation zwischen Benutzer und REM-Steuerung erforderlich, die nicht über die Benutzerschnittstelle zur Vermessung erfolgen kann, da diese unabhängig vom Gerätetyp sein soll.

In den weiteren Abschnitten dieses Kapitels werden zunächst *Modelle* für die Beschreibung von Strukturgeometrie und Vermessungsaufgaben eingeführt. Anschließend werden die konzeptionellen Details der Softwarekomponenten des Systems vorgestellt. Für die Auswertung muß die Funktionalität mit den zukünftigen Anwendern abgestimmt werden. Dies setzt eine vollständige Implementierung des Systems mit einem gewissen Umfang an Geometrie und Meßaufträgen als Diskussionsgrundlage voraus. In Kapitel 3.9 werden einige der möglichen Funktionen dieser Komponente kurz skizziert. Die Benutzerschnittstellen werden jeweils zusammen mit den Systemkomponenten beschrieben.

### 3.3 Geometriemodell

Zur Beschreibung der Geometrie von Objekten der realen Welt werden sogenannte Geometriemodelle benutzt. Beispielsweise alle CAD-Systeme benutzen solche Modelle, auf denen die rechnerinterne Geometriedarstellung beruht. Für den Austausch von Geometriedaten zwischen verschiedenen CAD-Systemen hat sich als Standard für das Datenformat IGES etabliert [69]. IGES unterstützt sowohl im 2D- als auch im 3D-Bereich das Datenformat von Draht-, Flächen- und Volumenmodellen. Als Erweiterung des reinen Geometriemodells in Richtung vollständiges Produktmodell, das neben den reinen Geometriedaten auch andere Objektparameter beinhaltet, wird STEP als Standard für den Informationsaustausch entwickelt [70].

Um im Rahmen des 3D-Vermessungssystems eine Planung des Vermessungsablaufs sowie die Vermessung selbst durchführen zu können, ist eine Beschreibung der Sollgeometrie notwendig. Genau wie bei CAD-Systemen wird auch hier ein eigener struktureller Aufbau des Modells erarbeitet. Das Modell muß an die speziellen Erfordernisse eines Vermessungssystems angepaßt sein und insbesondere die Beziehungen zwischen Meßaufträgen und der Strukturgeometrie berücksichtigen. Außerdem ist eine Erweiterbarkeit des Systems nur dann leicht durchführbar, wenn eine eigene Modellierung vorliegt, die entsprechend den auftretenden Erfordernissen modifiziert werden kann. In diesem Abschnitt wird ein Grundmodell entwickelt und verschiedene Möglichkeiten für dessen Erweiterung werden diskutiert. Das Hinzufügen neuer Geometrieformen beeinflußt weder das Modell für Vermessungsaufgaben noch die Konzeption des Grundsystems. Durch Umsetzung des Modells in einem objektorientierten Softwareentwurf, der in Kapitel 4 erläutert wird, gelingt es, die geometrische Datenverarbeitung von Funktionen des Grundsystems und auftragsabhängigen Funktionen zu trennen. Damit betrifft jede Veränderung am Geometriemodell, Umgestaltung oder Erweiterung, ausschließlich dieses Modell.

Zentraler Begriff des Modells ist das *geometrische Element* oder *Geometrieelement*. Sämtliche Eigenschaften der dreidimensionalen Geometrie werden mittels geometrischer Elemente beschrieben, d.h. sie werden bestimmten geometrischen Elementen als *Attribute* zugeordnet. Die Eigenschaft einer Position im Raum ist allen Geometrieelementen gemeinsam. Es werden vier *Haupttypen* von Geometrieelementen festgelegt:

- *Körper* als dreidimensionale Objekte, d.h. komplette Strukturen oder Strukturteile.
- *Oberflächen* als (i.allg. gekrümmte) zweidimensionale Objekte, die die Körper im Raum begrenzen.
- *Kanten* als (i.allg. gekrümmte) eindimensionale Objekte. Sie bilden die Grenzlinien zwischen einzelnen Oberflächen.
- *Ecken* sind nulldimensionale (punktförmige) Objekte. Sie sind Anfangs- bzw. Endpunkte von Kanten.

Die Beziehung zwischen dem Begriff Geometrieelement und den Haupttypen hat die Form:

*Haupttyp  $i$  ist ein Geometrieelement.*

Ferner bestehen zwischen den Haupttypen Beziehungen der Form (D: Dimension):

*Haupttyp  $i$  enthält Haupttyp  $j$  für  $D(i) > D(j)$*

*Haupttyp  $i$  gehört zu Haupttyp  $j$  für  $D(i) < D(j)$ .*

So enthält z.B. ein Körper diejenigen Oberflächen, die ihn begrenzen, eine Ecke gehört zu den Kanten, die an ihrer Position zusammentreffen. Diese Beziehungen werden dadurch in das Modell eingeführt, daß einem Haupttyp diejenigen Elemente, die er enthält oder zu denen er gehört, als Attribute zugeordnet werden.

Abhängig von speziellen Eigenschaften der Haupttypen Körper, Oberfläche und Kante können *Untertypen* eingeführt werden mit der Beziehung:

*Untertyp  $a$  ist ein Haupttyp  $i$ ,*

womit gleichzeitig impliziert wird:

*Untertyp  $a$  ist ein Geometrieelement.*

Für Ecken werden keine Untertypen eingeführt. Sie haben nur zwei Eigenschaften, eine Position, die bereits durch die Tatsache, daß sie Geometrieelemente sind, eingeführt wird, und ihre gehört zu-Beziehungen, die durch den Haupttyp abgedeckt sind. Für das System COSMOS-2D wurde eine ähnliche Modellierung der Geometrie vorgenommen [23][71], wobei drei wesentliche Unterschiede zu verzeichnen sind:

- Während im 3D-Fall Körper als Objekte mit der höchsten auftretenden Dimension eingeführt werden, existieren im COSMOS-2D-Modell keine Flächen. Meßaufträge können beim 3D-System direkt auf Körper bezogen werden, während analog dazu beim 2D-System ein solcher Bezug auf Flächen nicht möglich ist.
- Ecken werden im Hinblick auf die Mustererkennung im 2D-Fall in Untertypen eingeteilt und zwar je nach angrenzenden Kantentypen, wobei entweder genau zwei Kanten an einer Ecke zusammentreffen oder eine Ecke dadurch definiert ist, daß eine Kante den Bildausschnitt verläßt. Der Verlauf der angrenzenden Kanten in der zweidimensionalen Abbildung wird ausschließlich durch die geometrischen Parameter

im Datenmodell beschrieben, da eine Szene immer senkrecht zur Bild- und Beschreibungsebene betrachtet wird. Im dreidimensionalen Fall hängen sowohl die Anzahl sichtbarer Kanten, als auch deren Verlauf in der Abbildung von der gewählten Blickrichtung ab, so daß alle möglichen Ausprägungen von Ecken auftreten können und eine Einteilung in Untertypen nach diesen Kriterien nicht mehr sinnvoll ist.

- Die **enthält-** und **gehört zu-**Beziehungen sind im 2D-Fall sehr einfach: jede Ecke besitzt zwei angrenzende Kanten und jede Kante enthält zwei Ecken als Anfangs- und Endpunkt. Deshalb werden diese Beziehungen als Attribute (Vorgänger und Nachfolger) eines Geometrieelements (im 2D-Modell *Topologische Repräsentation* genannt) eingeführt. Vorgänger und Nachfolger sind dann bei Ecken die beiden Kanten und bei Kanten die beiden Ecken.

Als Koordinatensystem für die Geometriebeschreibung in drei Dimensionen werden Substratkoordinaten eingeführt, d.h. die  $x,y$ -Ebene<sup>1</sup> des Koordinatensystems liegt in der Substratebene.

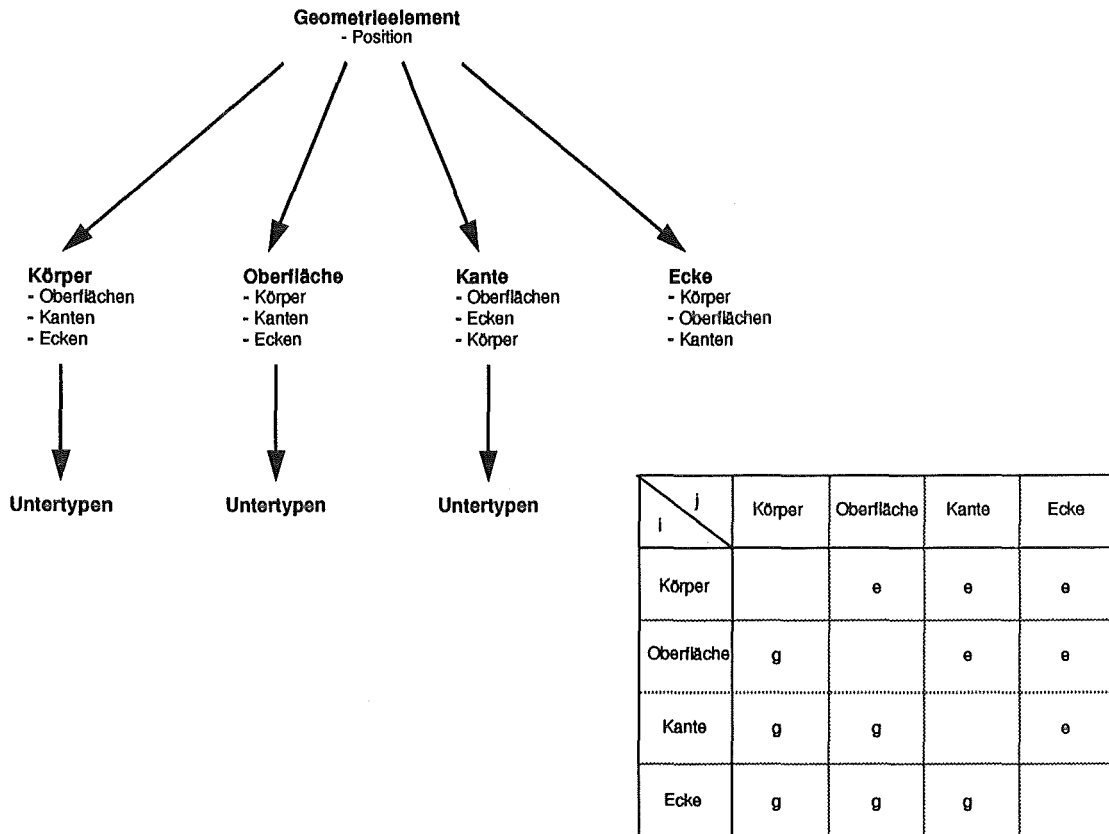


Abb. 14

*Geometrie-Grundmodell: Geometrieelemente sind in die Haupttypen Körper, Oberfläche, Kante und Ecke unterteilt. Jedes Geometrieelement besitzt eine Position. Die Haupttypen können weiter in Untertypen eingeteilt werden. Die Tabelle zeigt die **enthält-** und **gehört zu-**Beziehungen (e und g) zwischen Haupttypen i (Zeilen) und j (Spalten).*

Abb. 14 stellt den bisher festgelegten Umfang des Geometriemodells dar. Die Pfeile stehen dabei für die **ist-**Beziehungen, während die **enthält-** und **gehört zu-**Beziehungen in der Tabelle rechts unten festgelegt sind. Konkrete Untertypen werden bei der folgenden Diskussion der Er-

1. Der Index S zur Bezeichnung von Substratkoordinaten wird im folgenden nicht mehr verwendet.



weiterungsmöglichkeiten eingeführt. In dieser Form wird das Modell als *Grundmodell* festgeschrieben, d.h. ab hier kann es erweitert werden und diese Erweiterungen können, wenn notwendig, auch wieder geändert werden, ohne daß das Grundsystem davon betroffen ist, während die oben eingeführten Begriffe, Beziehungen und Attribute nicht mehr geändert werden dürfen. Folgende grundlegende Erweiterungsmöglichkeiten sind nun gegeben:

- Hinzufügen von Attributen zu den Haupttypen und zum Begriff Geometrieelement
- Hinzufügen neuer Haupttypen
- Definieren von beliebig vielen Untertypen zu den Haupttypen mit Ausnahme von Ecken, einschließlich Einführung beliebiger Attribute zu diesen Typen
- Aufteilung der Untertypen in weitere Typen auf darunterliegenden Ebenen und Definition beliebiger Attribute zu diesen Typen

Das Geometriemodell muß letztendlich ausreichend sein, um die Topologie von Mikrostrukturen vollständig zu beschreiben. Die Erweiterungen dienen in erster Linie dazu, diese Vollständigkeit bezüglich aller für eine bestimmte Anwendung gegebenen Fälle zu erreichen. Im folgenden werden nun Beispiele aufgeführt, bei denen die Anforderungen an das Modell sukzessive ausgedehnt werden und die jeweiligen Erweiterungsmöglichkeiten des Modells diskutiert.

## Polyeder

Polyeder sind Körper, die von ebenen Oberflächen begrenzt werden. Das Vermessungssystem soll nun als erste Anwendung Polyederstrukturen verarbeiten, die in zwei Erweiterungsschritten eingeführt werden. Im ersten Schritt wird der Begriff Polyeder zunächst eingeschränkt auf Körper, die von einfach zusammenhängenden Ebenen begrenzt werden, d.h. von Ebenen ohne Lö-

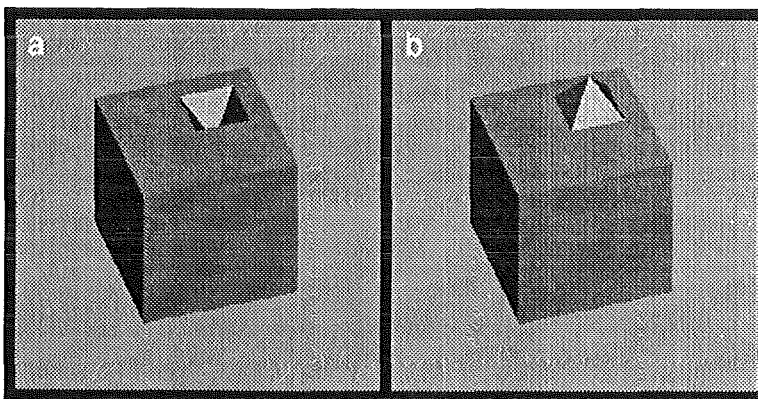


Abb. 15

*Polyeder mit zweifach zusammenhängender Oberfläche, die hier einmal durch Herausschneiden einer Pyramide aus einem Würfel (a) oder durch Aufsetzen einer Pyramide (b) entsteht.*

cher. Die beiden Fälle, in denen mehrfach zusammenhängende Ebenen auftreten, sind in Abb. 15 dargestellt. Abb. 15a zeigt einen Würfel, aus dem eine kleine Pyramide so herausgeschnitten wurde, daß keine der Würfelkanten berührt wird. In Abb. 15b wurde eine Pyramide, ebenfalls ohne Berühren der Kanten, aufgesetzt. In beiden Fällen entsteht eine zweifach zusammen-

hängende Ebene, wobei das Loch durch die Pyramidenbasis gebildet wird. Pyramide und Würfel stehen stellvertretend für beliebige Polyeder.

Das Geometriemodell wird nun folgendermaßen ergänzt (s. Abb. 16):

- Als Untertyp von Körpern werden Polyeder eingeführt (zunächst mit der o.g. Einschränkung).
- Als Untertyp von Oberflächen werden Ebenen eingeführt. Als Attribute erhalten sie einen Normalenvektor, der vom Körper aus gesehen nach außen zeigt, und den Abstand zum Koordinatenursprung.
- Als Untertyp von Kanten werden Geraden eingeführt. Um die Lage einer Geraden im Raum zu beschreiben, werden ein Punkt und ein Richtungsvektor benötigt.
- Ferner ist es vorteilhaft, bei Oberflächen die Kanten und Ecken, die sie enthalten, in einer bestimmten Reihenfolge anzugeben, um einen Umlaufsinn für die Berandung der Fläche festzulegen.

Um im zweiten Schritt auch mehrfach zusammenhängende Flächen zuzulassen, gibt es mehrere Möglichkeiten:

1. Für den in Abb. 15b dargestellten Fall muß keine Erweiterung des Modells vorgenommen werden. Ein Polyeder wird einfach in einen Grundkörper und mehrere Einzelkörper zerlegt, so daß keine mehrfach zusammenhängenden Flächen mehr vorliegen, wobei die abgetrennten Körper eine zusätzliche Fläche erhalten, die mit einem Flächenteil des Grundkörpers zusammenfällt, so daß hier stets eine Verdeckung vorliegt.
2. Für beide Fälle (Abb. 15a und b) kann die mehrfach zusammenhängende Fläche durch Schnitte von der äußeren Berandung zur inneren Berandung und (bei mehreren Löchern) zwischen den inneren Berandungen so aufgetrennt werden, daß eine einzige Umrandung für die Fläche entsteht, wobei jeder Schnitt durch zwei gleiche zusätzliche Kanten beschrieben wird, die in entgegengesetzter Richtung durchlaufen werden.
3. Als dritte Möglichkeit können sog. *imaginäre* Flächen eingeführt werden. Das sind Flächen, die nicht Grenzflächen eines materiellen Körpers zum Außenraum hin sind. Damit lassen sich die fehlenden Teilflächen bei mehrfach zusammenhängenden Flächen ergänzen. Der Haupttyp Oberfläche erhält dann als zusätzliche Attribute einen Parameter, der angibt, ob die Fläche *real* oder *imaginär* ist, sowie weitere (imaginäre) Oberflächen.

Die dritte Möglichkeit hat zwei Vorteile: Sie hat allgemeingültigen Charakter, da sie für beliebige Oberflächentypen angewandt werden kann. Ferner können Meßaufträge auf die imaginären Flächen bezogen werden, so kann etwa der Flächeninhalt eines fehlenden ebenen Teilstücks bestimmt werden

Prinzipiell ist die zweite Möglichkeit auch bei anderen Oberflächentypen einsetzbar, kann aber wegen der zusätzlich einzuführenden Kanten und wegen beliebiger Kantentypen für die inneren Ränder dazu führen, daß viele zusätzliche Oberflächentypen eingeführt werden müssen, womit die praktische Anwendung sehr komplex und unübersichtlich wird.

Abb. 16 beinhaltet auch die Erweiterung des Geometriemodells zur Beschreibung mehrfach zusammenhängender Oberflächen mit Hilfe imaginärer Flächen. Für Fälle wie in Abb. 15b ist auch die Zerlegung in mehrere Teilkörper erlaubt. Dieses Polyedermodell ist aus der Sicht des Vermessungssystems vollständig, d.h. alle geometrischen Berechnungen, die insbesondere bei

der Vorbereitung notwendig sind, können auf der Grundlage dieses Modells für Polyeder durchgeführt werden.

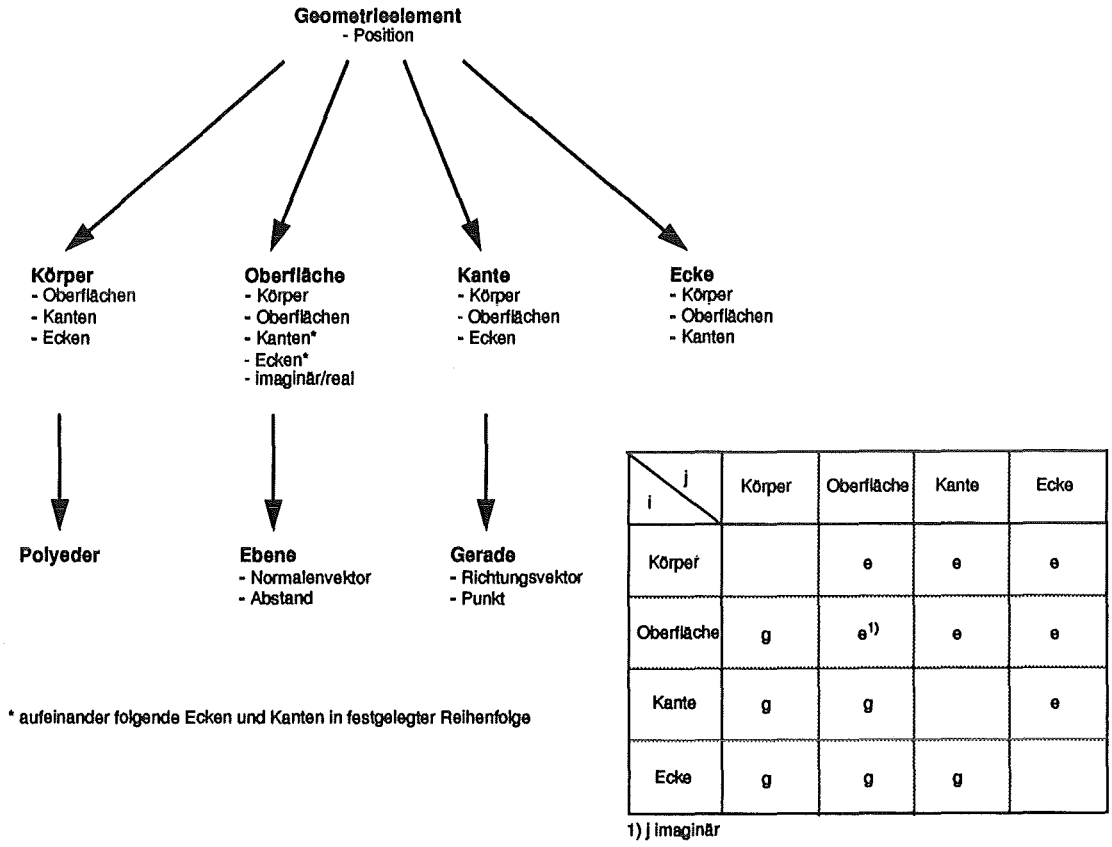


Abb. 16  
Erweitertes Geometriemodell zur Beschreibung von Polyedern. Mehrfach zusammenhängende Oberflächen können durch imaginäre Oberflächen beschrieben werden. Die Tabelle enthält nun auch einen Eintrag für die *enthält*-Beziehung zwischen einer realen und einer imaginären Oberfläche.

### Körper mit gekrümmten parametrisierbaren Oberflächen

Polyeder sind in gewisser Hinsicht einzigartige dreidimensionale Objekte. Ihre wesentlichen Eigenschaften lassen sich durch die Begriffe Ebene und Gerade beschreiben, das Geometriemodell bleibt damit einfach und überschaubar und doch können mit Hilfe dieser Begriffe sehr komplexe Strukturen beschrieben werden. Der Grund dafür liegt darin, daß sich Ebenen untereinander beliebig zusammensetzen lassen und die gemeinsame Kante immer vom selben Typ, nämlich eine Gerade, ist. Werden nun gekrümmte Oberflächen zugelassen, benötigt man sowohl zum Zusammensetzen unterschiedlicher Flächentypen als auch zum Zusammensetzen gekrümmter Flächen vom selben Typ eine Vielzahl neuer Kantentypen. Ferner lassen sich nun keine Körpertypen mehr definieren, die wie Polyeder aus einer beliebigen Anzahl von Oberflächen zusammengesetzt sind, ohne daß gleichzeitig sehr viele neue Oberflächen- und Kantentypen eingeführt werden müssen. Daher sollten nun schrittweise einfache Typen von Körpern eingeführt werden, die gerade ausreichen, um real vorliegende Strukturen zu beschreiben. Ein Zu-

sammenfassen mehrerer Körpertypen zu einem Typ ist dann möglich, wenn eine ausreichende Anzahl von Oberflächen- und Kantentypen vorliegt, die eine solche komplexe Beschreibung von Körpern unterstützt.

Als Beispiel wird der Typ "Gerader Kreiszyylinder" als neuer Körper definiert (Abb. 17). Seine Parameter sind Höhe  $h$ , Richtungsvektor  $r$  (parallel zur Symmetrieachse), Radius  $R$  und eine Position im Raum, die einem Punkt des Zylinders zugeordnet werden muß, beispielsweise seinem Mittelpunkt. Die Parameter werden ihm als Attribute zugeordnet. Jeder "Gerade Kreiszyylinder" kann mit einer seiner Endflächen auf der Substratebene oder jeder beliebigen ebenen Oberfläche einer anderen Struktur plaziert werden.

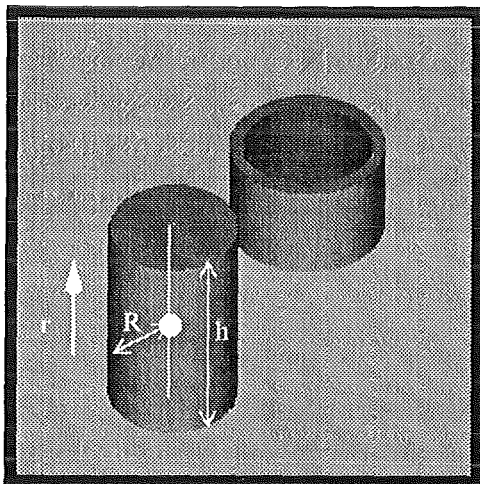


Abb. 17  
Gerader Kreiszyylinder und Hohlzyylinder, der mit Hilfe einer imaginären Kreisfläche ebenfalls beschrieben werden kann ( $R$ : Radius;  $h$ : Höhe;  $r$ : Richtungsvektor).

Die Endflächen des "Geraden Kreiszyinders" sind Ebenen, die durch einen Kreis begrenzt werden, der als neuer Kantentyp, ausgestattet mit den Attributen Radius und Richtungsvektor, eingeführt wird. Seine Position ist der Mittelpunkt. Der Oberflächentyp Ebene wird in zwei Typen aufgeteilt: Vielecke ohne zusätzliche Attribute und Kreisflächen mit dem Attribut Radius. Ferner wird ein Oberflächentyp für die Mantelfläche benötigt, die hier Kreiszyylinderfläche genannt wird. Er erhält die Attribute Radius, Höhe und Richtungsvektor (parallel zur Symmetrieachse), sowie ein Attribut, das die Außen- und Innenseite bezüglich des von der Fläche begrenzten Körpers festlegt. Das Attribut Kanten, durch das die **enthält**-Beziehung für die begrenzenden Kanten von Oberflächen beschrieben wird, enthält die Kreise der Kreiszyylinderfläche in beliebiger Reihenfolge.

Durch die Existenz imaginärer Flächen können beim bisherigen Umfang des Geometriemodells die Endflächen eines Geraden Kreiszyinders auch mehrfach zusammenhängende Flächen sein. Die herausgeschnittenen Teilkörper können entweder Polyeder oder "Gerade Kreiszyylinder" sein, so daß z.B. auch ein Hohlzylinder definiert werden kann.

Der "Gerade Kreiszyylinder" ist auch ein Beispiel für eine typische LIGA-Struktur, die als zweidimensionale Struktur (hier: Kreisfläche) entworfen wird und ihre dritte Dimension bei der Röntgentiefenlithographie durch eine Parallelprojektion senkrecht zur Substratebene erhält. Die Erweiterungen des Geometriemodells, die für den Einsatz des Vermessungssystems in der LIGA-Technik gemacht werden müssen, werden daher speziell solche Körper beschreiben, die ebene, durch unterschiedlich gekrümmte Kanten begrenzte Deck- und Grundflächen aufweisen, sowie senkrechte Wände. Dabei ist für jeden neuen Kantentyp ein entsprechender Oberflächentyp einzuführen, der in einer Richtung keine Krümmung aufweist, während sein laterales Krüm-

mungsverhalten dem des korrespondierenden Kantentyps entspricht. Aus der Sicht der Körpertypen lassen sich zwei grundlegende Typen unterscheiden. Im einen Fall besteht die Berandung von Deck- und Grundfläche aus einem geschlossenen Kantentyp (z.B. Kreis, Ellipse), d.h. der grundlegende Körpertyp ist ein zylindrischer Körper. Im anderen Fall ist diese Berandung durch mehrere an Ecken aneinanderstoßende Kanten gegeben (i. allg. unterschiedliche Typen). Dadurch besitzt der Körper in senkrechter Richtung gerade Kanten. Obwohl diese Körper beim LIGA-Verfahren auf der Substratoberfläche stehen, sollten die neu zu definierenden Typen mit entsprechenden Attributen so ausgestattet werden, daß sie eine beliebige Lage im Raum einnehmen können.

Polyeder und "Gerader Kreiszyylinder" als Beispiel für Körper mit gekrümmten parametrisierbaren Oberflächen wurden ausführlich diskutiert, um die Erweiterbarkeit des Geometriemodells zu demonstrieren, wobei das Grundmodell, das die Schnittstelle zum Vermessungssystem bildet, nicht verändert wurde. Von den o.g. grundlegenden Erweiterungsmöglichkeiten wurden alle genutzt außer der Hinzufügung neuer Haupttypen und neuer Attribute zum Begriff Geometrielement. Im folgenden werden nun noch zwei weitere Beispiele gegeben, die diese Erweiterungsmöglichkeiten nutzen, wobei jedoch kein vollständiges Geometriemodell mehr skizziert wird.

### Imaginäre Körper

Abb. 18a und b zeigen einen Fall, der beim LIGA-Verfahren häufig auftritt. Auf dem Substrat befinden sich einzeln stehende Strukturen, die durch einen im Modell definierten Körpertyp beschrieben werden (hier: "Gerade Kreiszyylinder"). Im vorhergehenden oder nächsten LIGA-Prozessschritt liegt eine dazu komplementäre Struktur vor, die sich über das gesamte Substrat erstreckt und zylinderförmige Löcher hat. Nach den bisher eingeführten Beschreibungsmög-

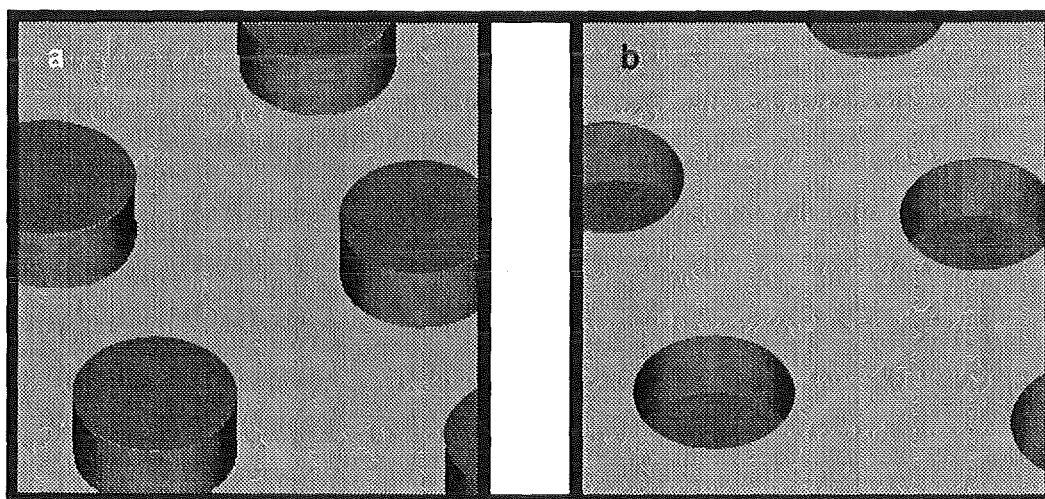


Abb. 18

*Typischer Fall beim LIGA-Verfahren: In aufeinanderfolgenden Prozessschritten liegen komplementäre Strukturen vor. Um solche Fälle einfach beschreiben zu können, wird die Einführung imaginärer Körper im Geometriemodell vorgeschlagen.*

lichkeiten existiert hier nur ein einziger Körper, nämlich ein Quader (Polyeder), der eine mehrfach zusammenhängende Deckfläche mit kreisförmigen Löchern und eine entsprechende Anzahl von Kreiszyylinderflächen enthält. Dabei ist nicht dieser Körper die interessierende

Struktur, sondern die immateriellen "Geraden Kreiszyylinder". Um ein Konzept für diesen häufig auftretenden Spezialfall in das Geometriemodell einzuführen, werden *imaginäre Körper* definiert, die immaterielle Strukturen darstellen und genau eine imaginäre Oberfläche enthalten, deren Außenseite mit der Außenseite des Körpers übereinstimmt. Die übrigen Oberflächen sind real, wobei ihre Außenseite in das Innere des Körpers gerichtet ist. Imaginäre Körper können wie imaginäre Oberflächen durch ein entsprechendes Attribut gekennzeichnet werden. Da nun bereits zwei Haupttypen dieses Attribut besitzen, wird es dem Begriff Geometrieelement zugeordnet. Für Kanten und Ecken hat das Attribut zunächst keine Bedeutung. Der materielle Körper enthält nun imaginäre Körper, wofür beim Haupttyp Körper ein Attribut für diese **enthält-Beziehung** eingeführt wird. Der Unterschied zur Beschreibung ohne imaginäre Körper soll nun anhand des vorliegenden Beispiels noch einmal explizit erläutert werden: Der materielle Körper enthält nach wie vor eine mehrfach zusammenhängende (Deck-)fläche mit imaginären Flächen (kreisförmige Löcher), aber nicht mehr die Kreiszyylinderflächen. Dafür enthält er imaginäre Körper, die nun ihrerseits die Kreiszyylinderflächen enthalten und somit eine gesonderte Beschreibung der immateriellen "Geraden Kreiszyylinder" darstellen.

Imaginäre Körper bieten drei Vorteile:

1. Meßaufträge können sich nun auf immaterielle Strukturen beziehen.
2. In dem beim LIGA-Verfahren gegebenen Spezialfall aufeinanderfolgender Komplementärstrukturen lassen sich die Geometriedaten für Strukturen eines Prozeßschrittes einfacher in die Daten für die komplementären Strukturen konvertieren. Die Vorgehensweise beim Übergang von einzeln stehenden Strukturen zu Lochstrukturen ist: Für jeden realen Körper wird ein imaginärer Körper erzeugt. Zusätzlich wird ein Quader erzeugt, der diese imaginären Körper enthält und dessen Deckfläche die imaginären Flächen dieser Körper enthält. Im umgekehrten Fall werden aus den imaginären Körpern reale Körper erzeugt. Alle realen Geometrieelemente des Quaders und der Quader selbst entfallen.
3. Das Konzept der imaginären Körper bietet eine weitere Alternative für die Beschreibung von Fällen wie in Abb. 15a, wobei allerdings die Beschreibung nur mit imaginären Oberflächen i. allg. vorzuziehen ist, da sie insgesamt mit weniger Geometrieelementen auskommt.

Das Konzept imaginärer Geometrieelemente kann auch auf Kanten und Ecken ausgedehnt werden. Die Bedeutung einer solchen Erweiterung für das Modell und für das gesamte Vermessungssystem wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Insbesondere sind hier auch umfangreiche Auswirkungen auf die Verifikationsmöglichkeiten von Geometrieelementen zu beachten, da imaginäre Kanten und Ecken in Abbildungen nicht detektiert werden können.

### Singuläre Flächenpunkte

Die Spitze eines Kegels ist ein Beispiel für einen singulären Flächenpunkt oder Kegelpunkt. Die Beschreibung eines Kegelpunktes als Ecke, die zu keiner Kante und nur zu einer Fläche gehört, ist problematisch, da bei der Erkennung einer Ecke Anzahl und Richtung der angrenzenden Kanten in den Abbildungen eine bestimmte Ecke beschreiben und damit für die Erkennungsoperation ein wichtiges Kriterium sind. Da nun ein singulärer Flächenpunkt keine Kanten hat, kann er auch nicht anhand dieser Kanten identifiziert werden. Er wird in einem Bild entweder gänzlich ohne Kanten erscheinen, oder durch zwei Horizontlinien festgelegt sein, die durch die Konturen der in zur Bildebene senkrechter Richtung gekrümmten Fläche zustandekommen (s:

Abb. 19). Er muß bei der Vorbereitung anders als eine Ecke behandelt werden, da zur Bestimmung der Konturen die Oberfläche, zu der er gehört, anstelle von Kanten herangezogen werden muß. Ferner bestehen bei der Mustererkennung Unterschiede, für den Fall, daß keine Horizontlinien vorliegen und somit keine Konturen, die an den Punkt angrenzen, extrahiert werden können. Aus diesen Gründen ist es angebracht, singuläre Flächenpunkte als neue Haupttypen einzuführen. Sie besitzen nur eine Oberfläche und einen Körper, zu denen eine gehört zu-Beziehung besteht.

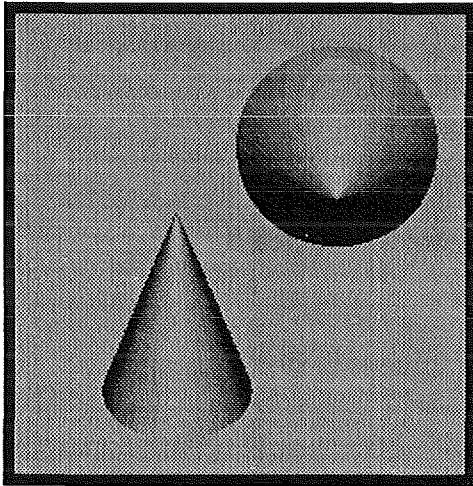
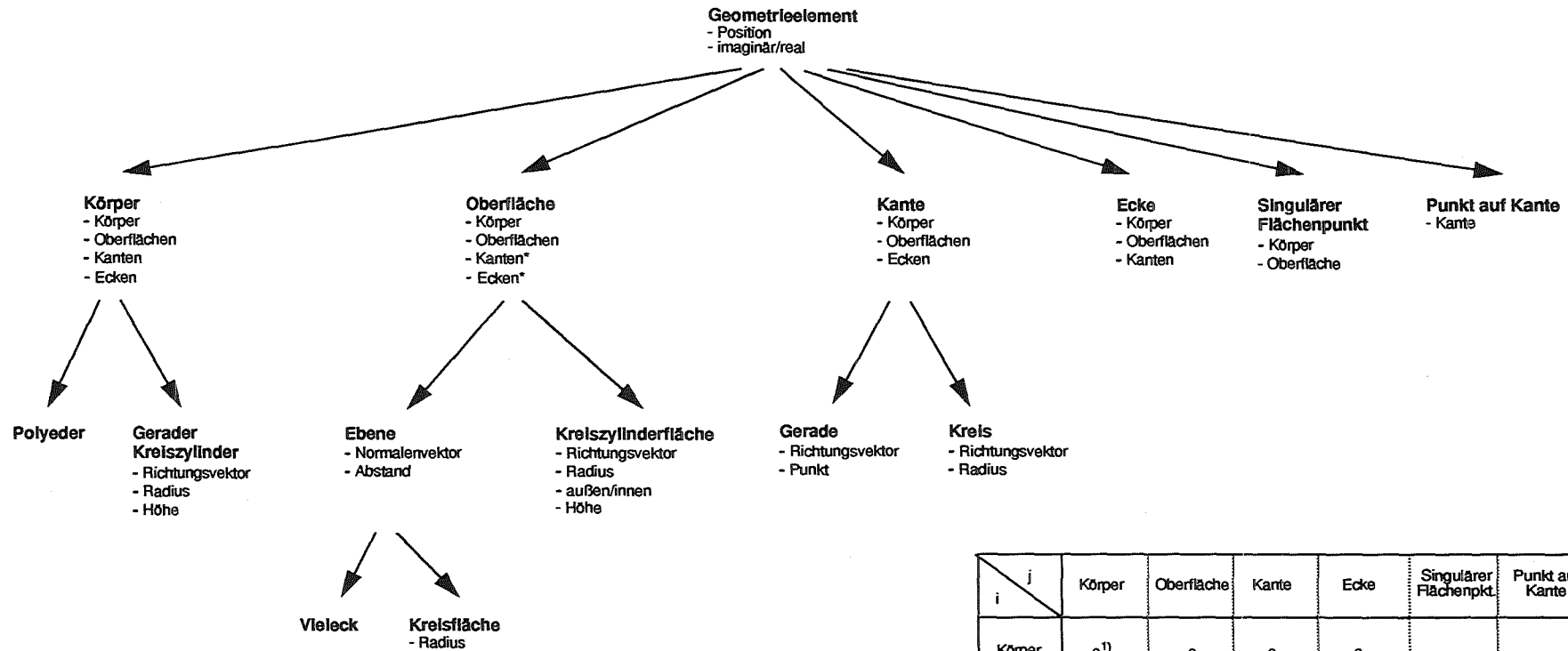


Abb. 19  
Kegelspitze als singulärer Flächenpunkt:  
Die Besonderheiten bei der Abbildung singulärer Flächenpunkte (angrenzende Horizontlinien oder keine angrenzende Konturen) sprechen für die Definition eines neuen Haupttyps.

Punkte auf Kanten sind ein weiteres Beispiel für die Einführung neuer Haupttypen. Solche Punkte sind für die Beschreibung der Strukturgeometrie nicht notwendig, müssen aber in dieser Beschreibung enthalten sein, wenn ein Meßauftrag auf sie bezogen wurde. Außer ihrer Position besitzen solche Punkte nur noch ein Attribut für ihre gehört zu-Beziehung zu der Kante, auf der sie liegen.

Die Beispiele sollen verdeutlichen, wie das "leere", nicht veränderbare Grundmodell (Abb. 14) sukzessive erweitert werden kann, um neuen (in den Beispielen z.T. noch hypothetischen) Anforderungen gerecht zu werden. Die Erweiterungen sind entweder konzeptioneller Natur (imaginäre Elemente) oder bestehen einfach im Hinzufügen neuer Typen. Abb. 20 zeigt den Umfang des bisherigen Modells. Es ist in dieser Form sicherlich nicht das einzig mögliche Modell für eine dem Konzept des 3-D-Vermessungssystems angepaßte Geometriebeschreibung, wird aber in der hier skizzierten Form den bisher absehbaren Anforderungen gerecht<sup>1</sup>.

1. Über die bisher vorgenommenen Implementierungen s. Kapitel 5



\* aufeinander folgende Ecken und Kanten in festgelegter Reihenfolge

Abb. 20  
Geometriemodell mit allen im Text aufgeführten Beispielen. Neu eingeführt wurden die Haupttypen Singulärer Flächenpunkt und Punkt auf Kante. Die Typen Kreiszylinderfläche und Kreis werden für die Beschreibung des neuen Körpertyps "Gerader Kreiszylinder" benötigt. Wegen der unterschiedlichen Berandung wurde der Typ Ebene in die Typen Vieleck und Kreisfläche unterteilt. Die Tabelle enthält nun auch Beziehungen für die neuen Haupttypen.

$i \backslash j$	Körper	Oberfläche	Kante	Ecke	Singulärer Flächenpkt.	Punkt auf Kante
Körper	e <sup>1)</sup>	e	e	e		
Oberfläche	g	e <sup>1)</sup>	e	e	e <sup>2)</sup>	
Kante	g	g		e		
Ecke	g	g	g			
Singulärer Flächenpkt.	g	g				
Punkt auf Kante			g			

1) j imaginär

2) nur für bestimmte Oberflächentypen



### 3.4 Meßaufträge

Zentraler Begriff in der Konzeption des gesamten Vermessungssystems ist der *Meßauftrag* [72]. Es wird davon ausgegangen, daß bei der Qualitätskontrolle von seiten der Anwender eines Vermessungssystems zahlreiche Wünsche für Vermessungsaufgaben geäußert werden. Dabei werden bei neuen Produkten, insbesondere abhängig von der Geometrie der Mikrostrukturen, neue Aufgaben hinzukommen. Der Begriff Meßauftrag definiert eine Form, durch die eine Vermessungsaufgabe vom Vermessungssystem verarbeitet werden kann. Diese Form bildet die Schnittstelle zum Vermessungssystem. Jeder neue Vermessungswunsch, der vom Anwender mehr oder weniger frei formuliert wird, muß der Form eines Meßauftrags angepaßt werden. Diese Form ist einfach und bietet daher sehr flexible Möglichkeiten für die Anpassung eines Vermessungswunsches.

Zu einem Meßauftrag gehört eine *Meßgröße* und ein oder mehrere Geometrielemente, auf die er sich bezieht, d.h. an denen die Meßgröße bestimmt werden soll (*Bezugsobjekte* eines Meßauftrags). Meßaufträge werden in unterschiedliche Typen eingeteilt, wobei der Typ ausschließlich durch die Art der Meßgröße festgelegt ist. Der Typ der Bezugsobjekte spielt bei der Festlegung eines Meßauftrags keine Rolle. Die Anzahl der Bezugsobjekte ergibt sich aus der Art der Meßgröße.

Ein Beispiel: Die Meßgröße *Distanz* legt den Typ eines Auftrags fest und impliziert gleichzeitig, daß er zwei Bezugsobjekte hat. Da jedes geometrische Element, gleich welchen Typs, eine Position besitzt, kann ein Distanzauftrag zur Bestimmung des Abstandes zwischen den Objektpositionen für jedes beliebige Paar von Geometrielementen definiert werden<sup>1</sup>. Eine Unterscheidung von Meßauftragstypen nach den Typen der Bezugsobjekte würde bereits in diesem einen Fall eine sehr große Zahl von Meßauftragstypen erfordern (bei  $n$  Geometrieelementtypen  $n(n+1)/2$  Auftragstypen). Eine Folge davon ist, daß die Übersichtlichkeit des Modells für Meßaufträge mit der Zeit immer stärker reduziert wird. Viel gravierender jedoch ist die Tatsache, daß die Einführung eines neuen Geometrieelementtyps eine Änderung bei den Meßaufträgen nach sich zieht, wobei beim Distanzauftrag  $(n+1)$  neue Typen definiert und implementiert werden müssen. Damit ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Flexibilität des gesamten Vermessungssystems verletzt, daß nämlich eine Erweiterung des Geometriemodells keine Auswirkungen auf die Meßaufträge haben darf.

Die Meßgröße eines Auftrags muß nicht unbedingt ein geometrischer Parameter sein. Es kann sich dabei auch um ein Gütekriterium handeln, das zur Beurteilung der Qualität etwa einer Kante dient. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß es ein vorrangiges Ziel ist, zunächst nur geometrische Parameter zu bestimmen, also Vermessungen im eigentlichen Sinn durchzuführen. Daneben lassen sich in das Konzept aber durchaus auch Aufträge einbinden, bei denen die durchzuführende Aufgabe mehr qualitativen Charakter hat. Ein Meßauftragstyp von grundlegender Bedeutung ist der Typ *Verifikation*, der beliebige Bezugsobjekte haben kann. Seine Meßgröße kann genau zwei Werte annehmen: 1 bzw. "Ja" mit der Bedeutung "Geometrielement konnte identifiziert werden" und 0 bzw. "Nein" für die entsprechende negative Aussage. Das Vermessungssystem muß nur dann Stereobildpaare akquirieren, wenn geometrische Parameter im 3D-Raum bestimmt werden sollen. Bei Aufträgen mit qualitativen Parametern und Verifikationen genügt ein Einzelbild.

---

1. In welchen Fällen ein Anwender einen Distanzauftrag für sinnvoll hält, muß dieser bei der Erzeugung eines Auftrags nach ihm vorliegenden Kriterien entscheiden.

Jeder Meßauftrag erhält noch eine *Sollgenauigkeit* (relativ oder absolut), die optional beim Erzeugen eines Meßauftrags angegeben werden kann. Bei bestimmten Aufträgen, wie z.B. der Ermittlung eines Gütekriteriums, kann anstelle einer Genauigkeit auch eine Mindestauflösung angegeben werden. Die Sollgenauigkeit wird eingeführt, weil eine verminderte Genauigkeit in sehr vielen Fällen dazu führt, daß für die Stereobilder vom System eher kleinere Kippwinkel gewählt werden. Dadurch werden die Tischverfahrenzeiten bei der Vermessung verringert. In der Regel wird es jedoch erwünscht sein, mit maximal möglicher Genauigkeit zu messen.

Wird ein neuer Vermessungswunsch formuliert, muß nur die Meßgröße spezifiziert werden, um ihn dem Vermessungssystem als Meßauftrag übergeben zu können. In der Regel wird für eine neue Meßgröße ein neuer Meßauftragstyp definiert werden. In einigen Fällen kann es bereits genügen, die Bedeutung der Meßgröße eines vorhandenen Meßauftrags zu erweitern, so daß er für eine größere Zahl von Bezugsobjekten sinnvoll ist. Wenn beispielsweise ein Auftrag **Kantenlänge** existiert und nun der Flächeninhalt von Oberflächen bestimmt werden soll, kann anstelle des neuen Auftrags **Flächeninhalt** der Auftrag **Kantenlänge** unter einer neuen Bezeichnung (z.B. **n-dimensionales Volumen**) auf Flächen und darüberhinaus bereits für die Volumenbestimmung auf Körper ausgedehnt werden. Dem Anwender kann diese etwas unanschauliche Zusammenfassung von Begriffen verborgen bleiben. Ihm können die Aufträge als drei verschiedene Typen präsentiert werden.

Abb. 21 verdeutlicht das Modell der unterschiedlichen Meßauftragstypen, die zu dem Begriff Meßauftrag in einer ist-Beziehung stehen. Dem Begriff Meßauftrag werden hier noch keine Attribute zugeordnet, während jeder Auftragstyp die Attribute Bezugsobjekte und Sollgenauigkeit (sofern sinnvoll) erhält, die einzigen Eingabedaten für das Vermessungssystem. Ferner erhält jeder Typ ein Attribut, das zur Aufnahme des Meßergebnisses bei der Vermessung bestimmt ist. In der Abbildung sind folgende Aufträge als Beispiele vorhanden:

- **Verifikation:** sinnvoll für alle Geometrielemente
- **Distanz:** ebenfalls für alle Geometrielemente sinnvoll
- **Winkel:** Die Bestimmung eines Winkels zwischen zwei Bezugsobjekten ist zumindest für Ebenen (Normalenvektor) und Geraden (Richtungsvektor) sinnvoll.

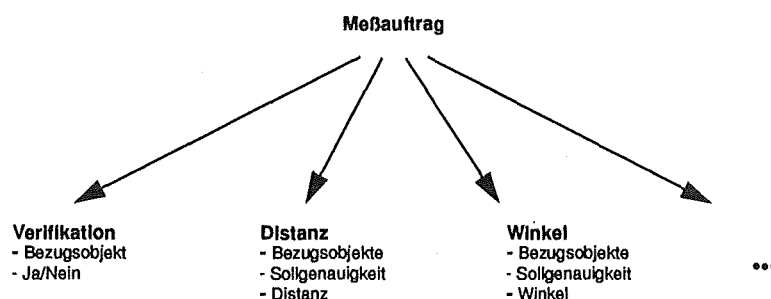


Abb. 21  
Einteilung von Meßaufträgen in verschiedenen Typen, die von der Art der Meßgröße abhängen.

Zum Abschluß der Diskussion von Modellen für Geometrie und Vermessungsaufgaben bleibt noch die Frage zu klären, woher das System seine Eingabedaten erhält. Beim Entwurf von Mikrostrukturen in einem CAD-System werden die geometrischen Eigenschaften festgelegt. Das Vermessungssystem benötigt eine Schnittstelle zum CAD-System. Die Geometriedaten müssen aus dem für das CAD-System verwendeten Datenformat (z.B. IGES [69]) in das Format des Vermessungssystems konvertiert werden (s. Abb. 22). Es wird vorausgesetzt, daß eine vollständige Beschreibung der Strukturgeometrie vorliegt. Um Vollständigkeit zu gewährleisten, ist nicht unbedingt eine dreidimensionale Geometriebeschreibung notwendig. So reicht etwa bei einfachen LIGA-Strukturen eine zweidimensionale Beschreibung der lateralen Strukturgeometrie aus. Die senkrechten Wände und Kanten sowie die Grundfläche und die unteren Strukturkanten können bei der Datenkonvertierung erzeugt werden.

Zwischen Geometriedaten und Meßauftragsdaten besteht ein wesentlicher konzeptioneller Unterschied. Die Mikrostrukturen besitzen geometrische Eigenschaften, unabhängig davon, ob geometrische Parameter gemessen werden sollen oder nicht. Dementsprechend erfolgt die Beschreibung der Geometrie im CAD-System nicht zum Zweck der Vermessung, sondern zur Steuerung des Herstellungsprozesses. Eine Beschreibung von Meßaufträgen wird dagegen ausschließlich für das Vermessungssystem benötigt. Daher muß die Diskussion des Systemkonzeptes auch auf die Möglichkeiten zur Erzeugung von Meßaufträgen eingehen.

Durch die Tatsache, daß sich Meßaufträge auf Mikrostrukturen und damit auf Geometrieelemente beziehen, muß die Auftragserzeugung eine Schnittstelle zu den Geometriedaten haben. Beim System COSMOS-2D besteht die Lösung darin, die Möglichkeiten des CAD-Systems zur Bemaßung eines Entwurfs zu nutzen. Meßaufträge werden als "attached text" erzeugt und sind damit Bestandteil der CAD-Daten (IGES-Format) [73] (in Abb. 22a dargestellt). Diese Lösung funktioniert dann problemlos, wenn die Geometrieelemente, auf die sich Meßaufträge beziehen, auch im CAD-System bekannt sind. Auch beim 3D-System kann die Bemaßung zur Auftragserzeugung genutzt werden, wenn dies der Fall ist. Die prinzipielle Möglichkeit, beliebige Meßaufträge auf beliebige geometrische Elemente zu beziehen, ist dann allerdings eingeschränkt durch das Geometriemodell des verwendeten CAD-Systems. So kann beispielsweise bei einem Meßauftrag, der sich auf eine senkrechte Kante einer LIGA-Struktur bezieht, diese Beziehung bei der Auftragserzeugung nicht ausgedrückt werden, wenn nur eine zweidimensionale Geometriebeschreibung vorliegt und die betreffende Kante im CAD-System gar nicht bekannt ist. Für die Auftragserzeugung ein Feature des CAD-Systems zu benutzen, bedeutet ferner wegen der konzeptionellen Zugehörigkeit der Auftragserzeugung zum Vermessungssystem eine Verflechtung von CAD und Vermessung. Da die Anwender unterschiedliche CAD-Systeme mit unterschiedlichen Datenformaten benutzen, ist die Realisierung einer Auftragserzeugung abhängig vom Umfeld, in dem das Vermessungssystem eingesetzt wird. Es wird daher das in Abb. 22b gezeigte Modell vorgeschlagen: Die Schnittstelle zum CAD-System ist nur für die Geometriedaten zuständig. Für die Auftragserzeugung wird ein eigenständiges Werkzeug eingesetzt, das mit den Geometriedaten im Format des Vermessungssystems operiert. Die Bedienung kann etwa wie folgt aussehen: Auf einer Benutzeroberfläche werden dem Anwender die Mikrostrukturen visualisiert. Er hat die Möglichkeit, interaktiv beliebige Geometrieelemente zu selektieren und sich die für diese Kombination von Elementen in Frage kommenden Aufträge anzeigen zu lassen. Aus dieser Auftragsliste trifft er seine Wahl, der Auftrag wird erzeugt und die Eingabedaten für das Vermessungssystem stehen bereit. Dieses Werkzeug zur Auftragserzeugung kann parallel zum Vermessungssystem um neue Geometrieformen und neue Meßaufträge ergänzt werden. Die Auftragserzeugung ist so aber unabhängig vom CAD-System möglich und für alle Anwender auf einheitliche Art und Weise realisiert.

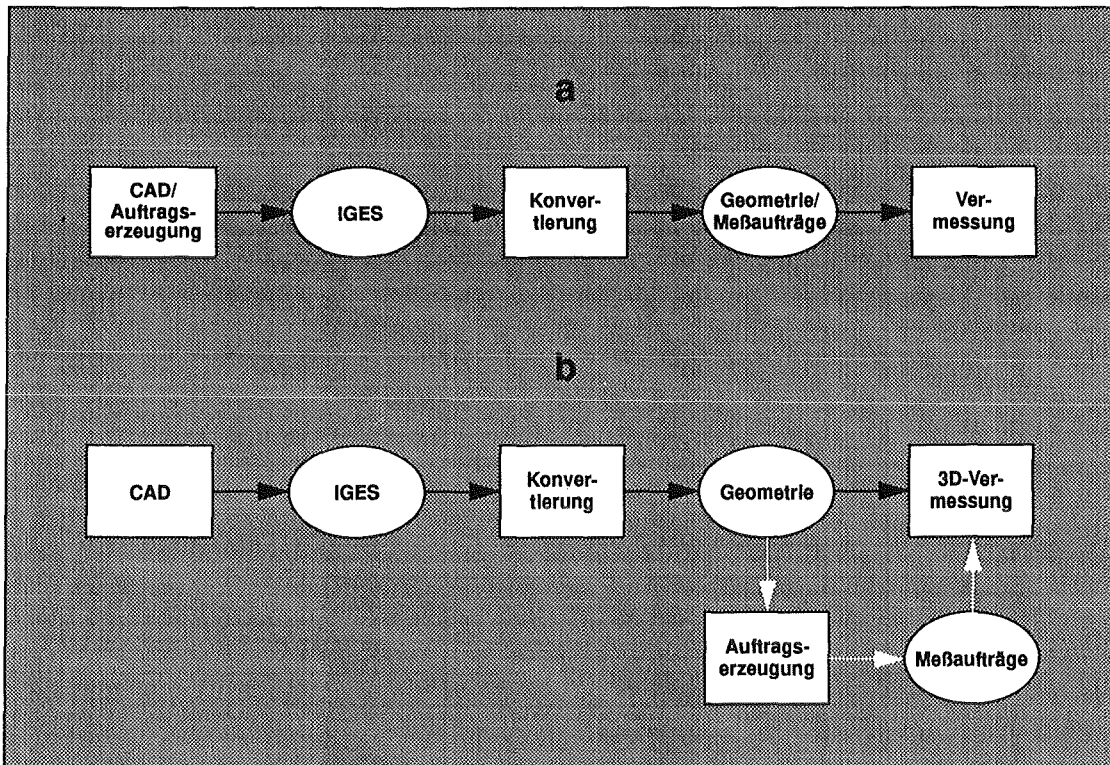


Abb. 22

a: Fluß der Geometriedaten und der Meßauftragsdaten vom CAD (z.B. IGES-Format; Aufträge als „attached text“) zum Vermessungssystem. Diese Form der Auftragserzeugung ist bei COSMOS-2D realisiert und kann als Modell für die Auftragserzeugung beim 3D-System dienen.

b: Alternative zu a: Ein Tool zur Auftragserzeugung benutzt die Geometriedaten im Format des Vermessungssystems und stellt die Meßaufträge als Eingabe für das System zur Verfügung (weiße Pfeile). Die schwarzen Pfeile symbolisieren hier nur den Fluß der Geometriedaten.

### 3.5 Probenparameter und REM-Beschreibung

Neben der Beschreibung der Geometrie der Mikrostrukturen benötigt die Vorbereitung auch Parameter, die die Probe als Ganzes beschreiben (*Probenparameter*), sowie Daten zur Beschreibung der Eigenschaften des eingesetzten Rasterelektronenmikroskops (*REM-Beschreibung*). Sie werden von der Vorbereitung für die folgenden beiden Aufgaben benutzt (s. auch Kapitel 3.6):

- Ermittlung von REM-Parametern, die unabhängig von den Meßaufträgen sind und zu Beginn einer Meßreihe eingestellt werden (*probenabhängige REM-Parameter*).
- Berechnung von *Systemparametern* bzw. auch direkte Verwendung als Systemparameter. Diese Parameter dienen bei der Vorbereitung einzelner Meßaufträge zur Steuerung von Funktionen.

Ein wichtiger Probenparameter ist z.B. das Material, aus dem die Mikrostrukturen bestehen. Der probenabhängige REM-Parameter Beschleunigungsspannung hängt von diesem Probenparameter ab. Weitere Beispiele sind die Substratabmessungen, von denen der maximal einstellbare Kippwinkel (Systemparameter) abhängt, und die maximale Strukturhöhe.

In der REM-Beschreibung sind z.B. die für den eingesetzten Gerätetyp zulässigen Werte für REM-Parameter enthalten. Beschleunigungsspannung und Vergrößerung können an einem Rasterelektronenmikroskop i. allg. nur in diskreten Stufen eingestellt werden. Während die Beschleunigung ein probenabhängiger REM-Parameter ist, hängt die einzustellende Vergrößerung vom Meßauftrag ab. Der entsprechenden Funktion zur Ermittlung der Vergrößerung müssen die einstellbaren Werte als Systemparameter zur Verfügung stehen. Die REM-Beschreibung stellt eine Spezifikation des Rasterelektronenmikroskops dar. Die darin enthaltenen Daten sind geräteabhängig. Diese Daten werden der Vorbereitung unter Berücksichtigung allgemeiner Probenparameter zur Verfügung gestellt. Dadurch kann die eigentliche Aufgabe der Vorbereitung, nämlich die Bearbeitung von Aufträgen (vgl. Abb. 23, S.56), geräteunabhängig erfolgen.

### 3.6 Vorbereitung

Die Systemkomponente Vorbereitung übernimmt die gesamte Planung des Meßablaufs für eine Meßreihe. Sie ist ein wichtiger Teil des gesamten Vermessungssystems. Ohne die automatische Meßablaufsplanung ist ein automatisches System zur Durchführung photogrammetrischer Vermessungen am Rasterelektronenmikroskop nicht denkbar. Nahezu jeder individuelle Meßauftrag an das System kann als Spezialauftrag aufgefaßt werden, da je nach Geometrie der betrachteten Strukturen und Auftragstyp besondere Entscheidungen für seine Durchführung zu treffen sind. Um diese These zu stützen, werden nun die wesentlichsten Punkte diskutiert, die bei der Meßablaufsplanung zu beachten sind, wobei von der Grundvoraussetzung "Ein Stereobildpaar pro Meßauftrag" ausgegangen wird.

1. Eigenschaften der Probe, wie z.B. das Material der Mikrostrukturen, spielen eine Rolle bei der Festlegung wichtiger REM-Parameter. Die Beziehungen zwischen diesen probenabhängigen REM-Parametern, die nur einmal zu Beginn einer Meßreihe eingestellt werden müssen, und den Probeneigenschaften sind noch relativ einfache Beziehungen und können im Prinzip noch vom Benutzer beurteilt werden.
2. Die einzelnen Meßaufträge unterscheiden sich in ihrem Typ, der nach dem Modell für Vermessungsaufgaben durch die zu bestimmende Meßgröße festgelegt ist. Der Meßauftragstyp wird vom Benutzer bei der Auftragserzeugung festgelegt. Der Auftragstyp alleine entscheidet noch nicht über die bei der Meßablaufsplanung durchzuführenden Aufgaben.
3. Der Typ der Bezugsobjekte legt die *Operationsfolge* fest, die von der Erkennung von Ecken und Kanten ausgeht, unter Umständen die Erkennung höherdimensionaler Objekte mit einschließt und über Zwischenberechnungen zwei- und dreidimensionaler geometrischer Parameter bis zur endgültigen Bestimmung der Meßgröße reicht. Allerdings ist die Operationsfolge durch die Bezugsobjekte nicht immer eindeutig festgelegt. Zum einen hängt es bei der Erkennung von Körpern und gekrümmten Oberflächen von der Blickrichtung ab, welche Ecken, Kanten und Horizontlinien erkannt werden müssen. Zum zweiten gibt es bei einigen Meßauftragstypen mehrere Möglichkeiten zur Durchführung (*Optionen* für die Operationsfolge), unabhängig von der Blickrichtung. Je mehr dieser Optionen berücksichtigt werden, umso größer ist die Chance, einen gegebenen Auftrag durchführen zu können. Der Benutzer müßte nun bei der Auftragserzeugung auch die Operationsfolge mit angeben und dabei auch berücksichtigen, ob eine Abhängigkeit von der Blickrichtung vorliegt, oder ob es mehrere Optionen für eine Operationsfolge gibt.

4. Da alle Ecken und Kanten, für die Erkennungsoperationen durchzuführen sind, in beiden Bildern eines Stereopaars erkannt werden müssen, hängt die Wahl eines Blickrichtungspaares von der Geometrie der umgebenden Strukturen ab. Dabei können alle im Geometriemodell vertretenen Geometrieelementtypen auftreten. Verdeckungen der zu erkennenden Elemente müssen ausgeschlossen werden. Ecken und Kanten, die im Bild erkannt werden sollen, werden im folgenden *Grundelemente* genannt. Ein Benutzer kann daher ein Blickrichtungspaar nur dann angeben, wenn er bei der Auftragserzeugung eine Visualisierung von Stereobildern zur Verfügung hat und die Strukturen am Bildschirm solange drehen und kippen kann, bis er sich davon überzeugt hat, daß die Bedingung Sichtbarkeit für alle Grundelemente in beiden Bildern erfüllt ist. Ferner ist auch ein *Aufsetzpunkt* (Punkt in der Substratebene, der in beiden Bildern in der Bildmitte liegt) festzulegen. Die Grundelemente müssen innerhalb des Bildausschnitts liegen und zwar in beiden Bildern. Dabei soll auch noch die Vergrößerung so hoch wie möglich sein, um eine hohe Meßgenauigkeit zu erreichen (s. auch 5.).
5. Vollständig spezifiziert wird ein Meßauftrag schließlich durch die Angabe einer Sollgenauigkeit. Ohne diesen Faktor ist die Überprüfung auf die Einhaltung von Toleranzen<sup>1</sup> nicht sinnvoll; die Meßgenauigkeit darf nicht über der geforderten Toleranz liegen. Nun hängt aber die erreichbare Genauigkeit von der Operationsfolge ab, da hier bei vielen Operationen die unterschiedlichsten, mit Ungenauigkeiten behafteten Größen in die Berechnungen eingehen. Sie muß also für jeden Fall extra berechnet werden. Nimmt ein Benutzer die Mühen dieser Berechnung auf sich und erhält schließlich das Ergebnis, daß die erreichbare Genauigkeit zu gering ist, muß er wieder bei der Bestimmung eines Blickrichtungspaares anfangen und/oder sogar die Operationsfolge neu festlegen. Einfache Abschätzungen (z.B. steigt die Genauigkeit mit der Vergrößerung, die aber mit der Wahl des Aufsetzpunktes verknüpft ist) sind i. allg. wenig hilfreich, wenn exakte Meßergebnisse gefordert sind.
6. Schließlich muß der Benutzer sehr genau über die Eigenschaften des eingesetzten Rasterelektronenmikroskops informiert sein, wenn er alle hier diskutierten Aufgaben erledigen will.

Ein Benutzer, selbst wenn er mit sehr viel Erfahrung Strategien entwickelt hat, um Meßaufträge vorzubereiten, kann mit vertretbarem Zeitaufwand nur einige wenige einfache Aufträge erzeugen, wenn ihm alle oben genannten Aufgaben auferlegt sind. Damit wird auch eine automatische Vermessung sinnlos und die Anwendung photogrammetrischer Meßmethoden anhand von Stereo-REM-Aufnahmen in der Qualitätskontrolle bei industrieller Fertigung ist auszuschließen. Die o.g. Probleme legen es nahe, den Benutzer bei der Auftragserzeugung durch geeignete Software zu unterstützen. Solche Vorschläge bedeuten aber, konsequent zu Ende gedacht, die gesamte Meßablaufsplanung in Form der Systemkomponente Vorbereitung zu automatisieren und dem Benutzer ein einfaches Konzept für die Formulierung von Meßaufträgen in die Hand zu geben, wie es in Kapitel 3.4 vorgeschlagen wurde. Für ihn ist dann lediglich wichtig, an welchen Geometrieelementen (Mikrostrukturen) er welche Parameter gemessen haben möchte und

---

1. Bisher wurde immer davon gesprochen, für das Messen eines geometrischen Parameters eine Sollgenauigkeit zu fordern. In der Qualitätskontrolle ist aber die Einhaltung von Toleranzen von Interesse. Die Sollgenauigkeit ergibt sich dann automatisch als Bruchteil der Toleranz, da eine Messung mit einer Genauigkeit, die über der Toleranz liegt, nicht sinnvoll ist. Für die Durchführung einer Vermessung ist aber die Sollgenauigkeit die entscheidende Größe und wird daher auch bei der weiteren Diskussion im Vordergrund stehen.

er ist in der Lage, in kurzer Zeit eine große Zahl von Meßaufträgen zu erzeugen. Letztendlich braucht er nicht einmal zu wissen, mit welchen Methoden seine Aufträge erfüllt werden.

Im folgenden wird nun das Konzept der Vorbereitung in mehreren Stufen vorgestellt bis zu einem Detaillierungsgrad, bei dem die wesentlichsten Züge dieser Systemkomponente charakterisiert sind. Einige Teilbereiche werden dabei ausgeklammert, wenn sie ohne Beeinträchtigung des Gesamten auch zu einem späteren Zeitpunkt weiterentwickelt werden können.

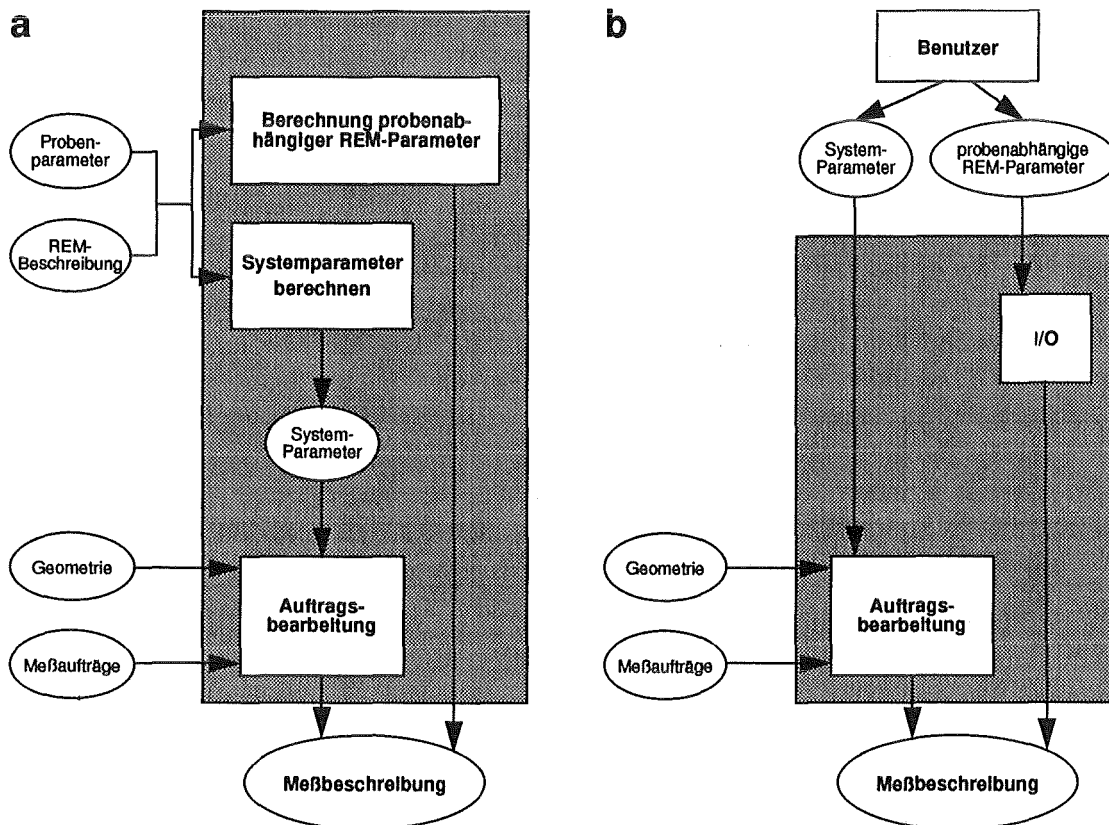


Abb. 23

Blockdiagramm der Systemkomponente Vorbereitung (graue Kästen):

a: Die Vorbereitung berechnet probenabhängige REM-Parameter und Systemparameter für die Auftragsbearbeitung und benutzt dazu Probenparameter und eine REM-Beschreibung als Eingabedaten. Die Benutzerschnittstelle ist hier nicht dargestellt, da der Benutzer in den Ablauf der Vorbereitung nicht mehr eingreifen muß.

b: Um die Entwicklungsarbeiten zunächst auf den wichtigsten Teil, die Auftragsbearbeitung zu konzentrieren, werden die beiden Module zur Berechnung probenabhängiger REM-Parameter und Systemparameter dadurch ersetzt, daß der Benutzer diese Parameter eingibt. Die probenabhängigen REM-Parameter werden direkt in die Meßbeschreibung eingetragen.

Abb. 23a zeigt in der ersten Verfeinerungsstufe drei Funktionsblöcke der Vorbereitung: **Berechnung probenabhängiger REM-Parameter, Systemparameter berechnen und Auftragsbearbeitung.**

## Probenabhängige REM-Parameter

Einige REM-Parameter hängen nur von allgemeinen Probenparametern ab und werden unter Berücksichtigung der REM-Beschreibung festgelegt. Es wurde bereits in Kapitel 3.5 das Beispiel Beschleunigungsspannung angegeben, die je nach Strukturmaterial auf einen der in der REM-Beschreibung angegebenen Werte festgelegt wird. Es handelt sich hier um eine Reihe einzelner Funktionen für jeden REM-Parameter. Die Parameter werden in die Meßbeschreibung eingetragen. Eine Beeinflussung der Konzeption der übrigen Funktionsblöcke liegt nicht vor. Es ist allenfalls denkbar, daß ein Parameter doch in irgendeiner Weise vom einzelnen Auftrag abhängt, wobei dann die Funktion zu seiner Berechnung lediglich in den Block Auftragsbearbeitung verschoben wird.

## Systemparameter

Systemparameter sind Parameter, die von der Auftragsbearbeitung benötigt werden, um deren Funktionen zu steuern. Zum Teil geht es dabei um eine Variationsmöglichkeit des Umfangs der Berechnungen. So wird etwa bei verschiedenen Blickrichtungen geprüft, ob eine Verdeckung von relevanten Strukturteilen vorliegt. Durch die Wahl der Anzahl dieser Blickrichtungen kann der Zeitaufwand für diese Berechnungen (z.B. bei konvexen, freistehenden Strukturen) erheblich reduziert werden. Weitere Systemparameter sind in Kapitel 3.5 aufgeführt. Systemparameter hängen von Probenparametern und/oder der REM-Beschreibung ab oder übernehmen einfach Daten von diesen Schnittstellen. Mit den Systemparametern als Eingabeparameter für die Auftragsbearbeitung wird diese von den Probenparametern und der REM-Beschreibung entkoppelt. Es sollen hier keine weiteren Systemparameter aufgezählt werden. Wo es bei der Diskussion der Auftragsbearbeitung nötig ist, werden noch einige Parameter erwähnt. Eine Liste aller bisher implementierten Systemparameter ist in Kapitel 5 enthalten.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind weder alle probenabhängigen REM-Parameter bekannt, noch kann davon ausgegangen werden, daß alle Systemparameter endgültig festliegen. Systemkonzeption, Softwareentwurf und Realisierung sind bei einem komplexen System iterative Tätigkeiten. In jedem Zyklus der Systementwicklung werden neue Erfahrungen gemacht, die beim nächsten Iterationsschritt berücksichtigt werden sollen. Um unnötige Arbeiten zu vermeiden, werden die Funktionsblöcke zur Berechnung von probenabhängigen REM-Parametern und von Systemparametern noch nicht näher spezifiziert. Beide Arten von Parametern werden im weiteren Verlauf der Systementwicklung zunächst vom Benutzer eingegeben (s. Abb. 23b). Aufgrund der gemachten Erfahrungen können einzelne Funktionen sukzessive spezifiziert und implementiert werden. Der verbleibende Funktionsblock, die Auftragsbearbeitung, ist der eigentliche Kern der Vorbereitung und wird im folgenden ausführlich diskutiert.

## Auftragsbearbeitung

Abb. 24 zeigt die erste Verfeinerungsstufe für die Auftragsbearbeitung. Es wird eine Liste von Blickrichtungspaaren berechnet, aus der bei der Suche nach einer geeigneten Blickrichtung für einen Meßauftrag eine Auswahl getroffen werden kann (**Liste der Blickrichtungen festlegen**). Bei einer optimalen Blickrichtung müssen alle zu erkennenden Geometrielemente sichtbar



sein und die vom Benutzer vorgegebene Sollgenauigkeit wird eingehalten. Jedes Blickrichtungspaar besteht aus den Normalenvektoren der rotierten und für das linke und das rechte Bild verkippten Substratebene, dem zugehörigen Rotationswinkel und den beiden Kippwinkeln<sup>1</sup>. Der Kippwinkelunterschied zwischen links und rechts ist konstant (Systemparameter *Stereokippwinkel*). Die Blickrichtungen sind innerhalb des maximal einsehbaren Raumwinkels (Kegel, dessen halber Öffnungswinkel der Systemparameter *Maximal einstellbarer Kippwinkel* ist) näherungsweise gleichverteilt und ihre Dichte - und damit Anzahl - kann über einen weiteren Systemparameter gewählt werden. Die Realisierung der Funktion ist in Kapitel 5 beschrieben.

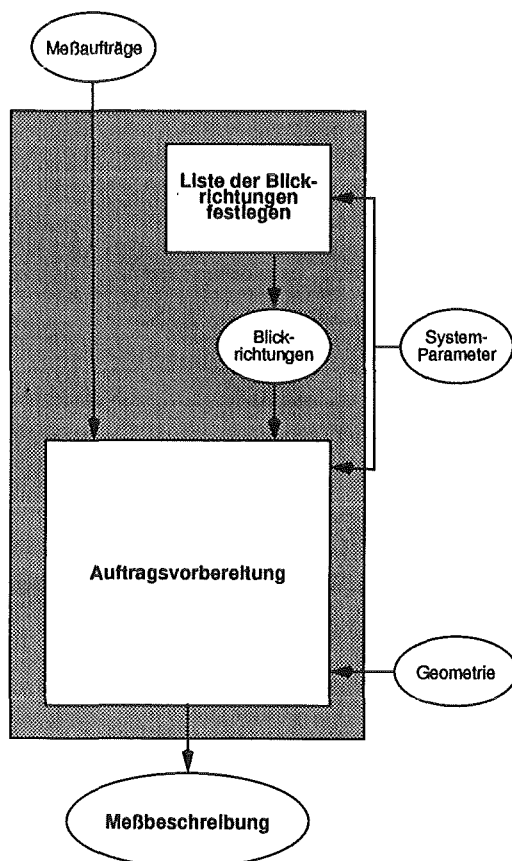


Abb. 24

Funktionsblöcke der Auftragsbearbeitung (grauer Kasten):

Es wird eine Liste von Blickrichtungen festgelegt, aus der bei der Vorbereitung der Meßaufträge eine Wahl für die geeignete Blickrichtung getroffen werden kann. Die Auftragsvorbereitung wird für jeden Auftrag durchgeführt. Nach dem letzten Meßauftrag ist die Auftragsbearbeitung und damit die gesamte Vorbereitung beendet.

Die **Auftragsvorbereitung** erhält die Liste mit diesen Blickrichtungen und Systemparameter. Über die externe Schnittstelle erhält sie ferner die Daten eines Meßauftrags, Geometriedaten der davon betroffenen Geometrielemente sowie Geometriedaten von den Geometrielementen, die in der Nähe der Bezugsobjekte des Auftrags liegen. Das bedeutet, es müssen alle Körper berücksichtigt werden, die so dicht bei den Bezugsobjekten liegen, daß die Möglichkeit einer Verdeckung besteht. Die Auftragsvorbereitung ermittelt Parameter zur Steuerung der Vermessung, die im folgenden näher spezifiziert werden und trägt sie in die Meßbeschreibung ein. Sie wird für jeden Meßauftrag durchlaufen. Nach dem letzten Auftrag ist die gesamte Vorbereitung beendet.

1. Statt von Blickrichtungspaarern wird im folgenden nur noch von Blickrichtungen gesprochen. Sofern nicht explizit darauf hingewiesen wird, ist damit immer ein Paar von Blickrichtungen gemeint.

Abb. 25 zeigt das Schema für die Auftragsvorbereitung. Jeder Meßauftrag durchläuft nacheinander die drei Stationen **Operationsfolge festlegen**, **Berechnung auftragsabhängiger REM-Parameter** und **Muster berechnen**. Die dabei berechneten Daten werden zusammen mit den Grunddaten in die Meßbeschreibung eingetragen (**Auftrag zusammenstellen**). Alle drei Funktionsblöcke benötigen Geometriedaten.

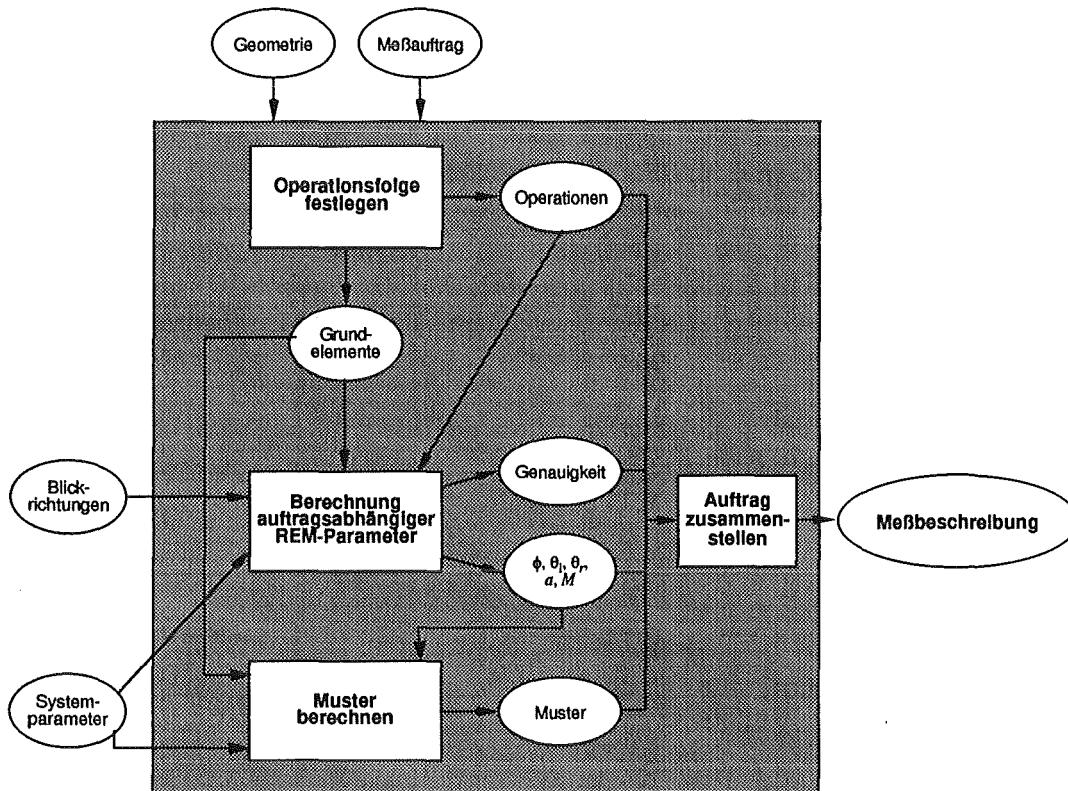


Abb. 25

*Funktionalität der Auftragsvorbereitung (grauer Kasten):*

*Die von den einzelnen Funktionsblöcken berechneten Daten (Operationsfolge, erreichbare Genauigkeit, auftragsabhängige REM-Parameter und Muster) sind Bestandteil der Meßbeschreibung. Alle drei Funktionsblöcke benötigen Geometriedaten und die Grunddaten des Meßauftrags.*

Die Operationsfolge eines Meßauftrags (abhängig von seinem Typ und dem Typ der Bezugsobjekte) kann in einem zyklusfreien, gerichteten Graphen dargestellt werden. Die Quelle einer Operationsfolge ist immer die Operation zur Berechnung oder Übernahme der Meßgröße; Senken sind die Eckenerkennungen (oder auch die Erkennung eines geschlossenen Kantentyps, z.B. Kreis, der keine Ecken enthält). Eine Operation hat Vorgänger (in Richtung Quelle) und Nachfolger (in Richtung Senken). Für jeden neuen Meßauftrag ist (mindestens) eine Operationsfolge festzulegen und gegebenenfalls sind neue Operationen zu definieren. Auf Zyklusfreiheit des Graphen ist dabei zu achten. Bis auf die Quelle einer Operationsfolge, die einem Meßauftrag zuzuordnen ist, bezieht sich eine Operation immer auf ein Geometrieelement.

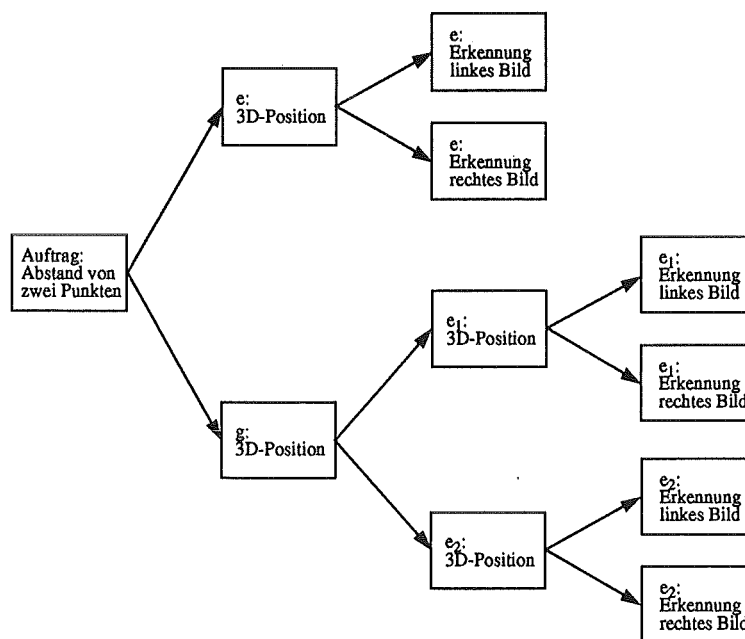
Beispiele für Operationsfolgen sind:

1. Meßauftrag **Verifikation** (Bezugsobjekt Ecke  $e$ ):



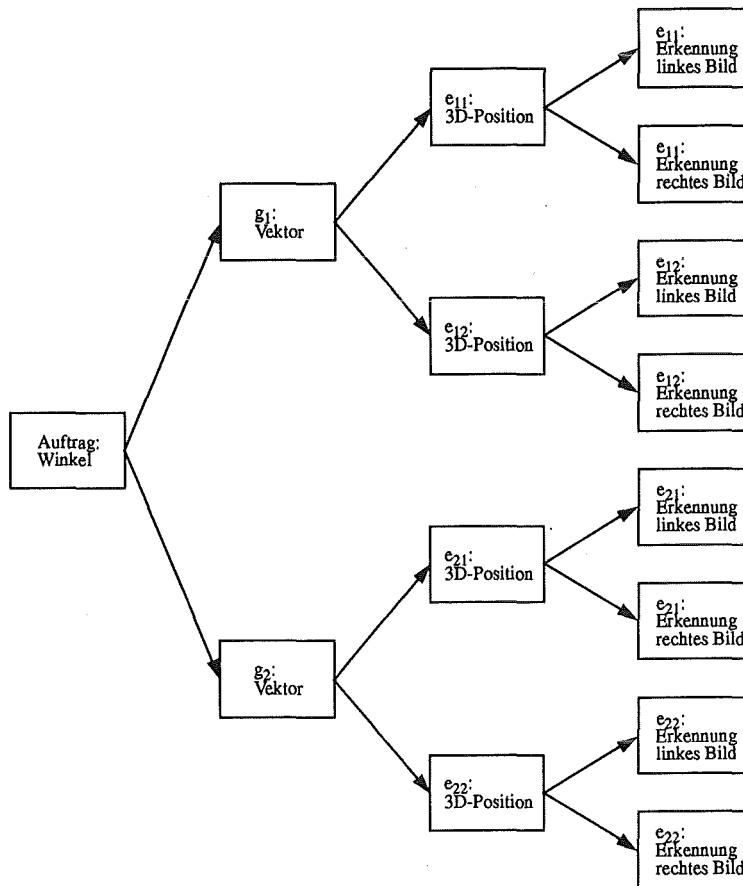
Dies ist der einfachste denkbare Auftrag. Er ist auch ein Beispiel für einen Auftrag, der in einem Einzelbild ausgeführt werden kann (linkes Bild). Die Erkennungsoperation liefert im allgemeinen Fall Pixellisten, bei einer Ecke ein einziges Pixel, und zeigt damit an, daß eine Erkennung stattgefunden hat. Konnte ein Geometrieelement nicht erkannt werden, wird keine Pixelliste zurückgeliefert. Die Operation des Auftrags ist trivial. Das Meßergebnis ist "Ja" oder "Ecke verifiziert", falls ein Pixel zurückgeliefert wird, und "Nein", falls kein Pixel zurückgeliefert wird.

2. Meßauftrag **Distanz** (Bezugsobjekte Ecke  $e$  und Gerade  $g$  mit Ecken  $e_1$  und  $e_2$ ):



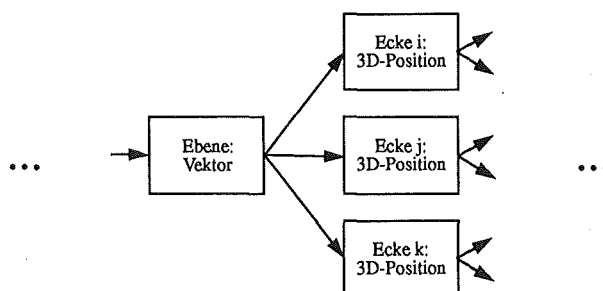
Die Operation 3D-Position einer Ecke ist eine Projektionsrechnung, die die Pixelkoordinaten der Ecke im linken und im rechten Bild als Eingabe benötigt. Als Position einer Geraden sei ihr Mittelpunkt definiert. Die Operation 3D-Position einer Geraden berechnet den Mittelpunkt als Mittelwert der 3D-Positionen ihrer Ecken. Die Operation des Auftrags berechnet den Abstand der 3D-Positionen der Bezugsobjekte.

3. Meßauftrag Winkel (Bezugsobjekte Gerade  $g_1$  (Ecken  $e_{11}$  und  $e_{12}$ ) und Gerade  $g_2$  (Ecken  $e_{21}$  und  $e_{22}$ )):



Die Operation Vektor einer Geraden berechnet den Richtungsvektor aus den 3D-Positionen ihrer Ecken. Die Operation Winkel des Auftrags berechnet den Winkel zwischen den beiden Richtungsvektoren.

Es gibt Operationen, bei denen unabhängig von der Blickrichtung stets mehrere Möglichkeiten für die Nachfolgeoperationen gegeben sind (Optionen einer Operation). Ein Beispiel wäre eine Operation Normalenvektor eines Vielecks. Im Prinzip reichen hier drei Ecken für die Bestimmung des Normalenvektors aus. Die Operationsfolge (Ausschnitt) für ein  $n$ -Eck sieht dann folgendermaßen aus:



Es gibt hier  $\binom{n}{3}$  Optionen für die Nachfolgeoperationen. Daneben gibt es noch weitere Optionen. So könnte z.B. die Position von mehr als drei Ecken bestimmt werden und der Normalenvektor als Mittelwert über alle möglichen Dreierkombinationen bestimmt werden. Damit die Operationsfolge eines Meßauftrags eindeutig festgelegt werden kann, wird hier genau eine Option ausgewählt werden, nach der die Operation durchgeführt werden soll (z.B. immer die ersten drei Ecken des Vielecks als Nachfolger).

Als Ergebnis des Funktionsblocks **Operationen festlegen** der Auftragsvorbereitung erhält der Meßauftrag eine Liste von denjenigen Geometrieelementen, für die Operationen vorbereitet wurden. Die Reihenfolge, in der Operationen durchzuführen sind, wird dadurch festgelegt, daß jedes dieser Elemente für jede vorbereitete Operation eine Liste mit den Geometrieelementen erhält, an denen die entsprechenden Nachfolgeoperationen durchzuführen sind. Die Grundelemente, also Ecken und Kanten, für die Erkennungsoperationen vorbereitet wurden, sind noch einmal extra gekennzeichnet. Sie werden von den beiden anderen Funktionsblöcken benötigt. **Operationen festlegen** benötigt Daten des Meßauftrags (die Bezugsobjekte als Einstieg in die Operationsfolge) und Daten von denjenigen Geometrieelementen, für die Operationen vorbereitet werden müssen. Es besteht auch die Möglichkeit, daß der Meßauftrag bereits hier zurückgewiesen wird, sei es, weil erforderliche Operationen noch nicht implementiert sind, oder weil falsche Bezugsobjekte angegeben wurden (in Abb. 25 nicht dargestellt).

Aufgabe des Funktionsblocks **Berechnung auftragsabhängiger REM-Parameter** ist es, die REM-Parameter Rotationswinkel  $\phi$ , Kippwinkel links  $\theta_l$ , Kippwinkel rechts  $\theta_r$ , Aufsetzpunkt  $a$  und Vergrößerung  $M$  zu berechnen, so daß der Meßauftrag mit der geforderten Sollgenauigkeit durchgeführt werden kann. Der Funktionsblock wird nur dann ausgeführt, wenn eine Operationsfolge festgelegt wurde und somit Grundelemente vorhanden sind. Ausgegeben werden die auftragsabhängigen REM-Parameter und die Genauigkeit, mit der der Meßauftrag durchgeführt werden kann.

Ein vollständiger Satz auftragsabhängiger REM-Parameter muß folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Grundelemente müssen aus der gewählten Blickrichtung sichtbar sein (i. allg. in beiden Bildern). Es wird aus den vorgegebenen Blickrichtungen eine ausgewählt, für die diese Bedingung erfüllt ist (Verdeckungsprüfung). Damit liegen ein vorläufiger Rotationswinkel und vorläufige Kippwinkel vor.
- Der Bildausschnitt ist von der Vergrößerung und vom Aufsetzpunkt abhängig. Die Grundelemente müssen im Bildausschnitt liegen (i. allg. in beiden Bildern). Die Vergrößerung soll so hoch wie möglich sein. Für die bei der Verdeckungsprüfung ausgewählte Blickrichtung ist der Aufsetzpunkt entsprechend zu optimieren. Es liegen dann ein vorläufiger Aufsetzpunkt und eine vorläufige Vergrößerung vor.
- Das entscheidende Kriterium für die Festlegung der ermittelten REM-Parameter ist die erreichbare Genauigkeit. Die Parameter können akzeptiert werden, wenn die erreichbare Genauigkeit nicht schlechter ist als die geforderte Sollgenauigkeit. Ist das nicht der Fall, wird ein neuer Parametersatz aus den noch verbliebenen Blickrichtungen berechnet. Dieses rekursive Verfahren wird solange fortgeführt, bis entweder ausreichende Genauigkeit vorliegt, oder keine weiteren Blickrichtungen mehr zur Auswahl stehen.

Es gibt damit für jeden Meßauftrag drei Möglichkeiten:

- Ein Meßauftrag kann mit der geforderten Sollgenauigkeit durchgeführt werden.
- Ein Meßauftrag kann nur mit einer schlechteren Genauigkeit durchgeführt werden. Es wird derjenige Parametersatz festgelegt, der die höchste Genauigkeit zuläßt. Die Aufträge sind entsprechend zu kennzeichnen, da eine verlässliche Aussage über die Einhaltung von Toleranzen nicht mehr gewährleistet ist.
- Ein Meßauftrag kann nicht durchgeführt werden, da keine Blickrichtung gefunden wurde, für die Verdeckungsfreiheit für alle Grundelemente in beiden Bildern vorliegt.

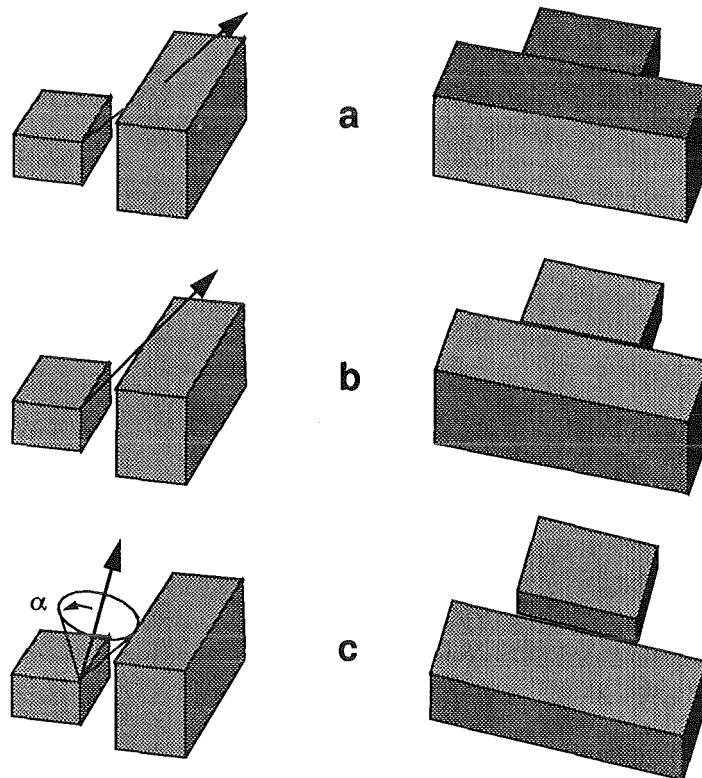


Abb. 26

Sicht auf einen Objektpunkt (Ecke des kleinen Quaders):

links: verschiedene Blickrichtungen (Pfeile)

rechts: Sicht jeweils aus der links angegebenen Blickrichtung

a: Sichtlinie schneidet zwei Oberflächen des großen Quaders, d.h. es liegt eine Verdeckung vor.

b: Der Objektpunkt ist gerade noch sichtbar, aber in der Praxis kann Verdeckungsfreiheit nicht gewährleistet werden.

c: Es wird Verdeckungsfreiheit für einen Kegel mit Öffnungswinkel  $\alpha$  um die Blickrichtung gefordert. Es ist eine ausreichend große Umgebung des Objektpunktes sichtbar. Eine Messung kann durchgeführt werden.

Für eine gegebene Blickrichtung (Einzelrichtung links oder rechts) und einen zu erkennenden Objektpunkt (z.B. eine Ecke) wird die Verdeckungsprüfung nach folgendem Prinzip durchgeführt: Die Sichtlinie (Gerade, die durch den Blickrichtungsvektor und die Position des betrachteten Objektpunktes beschrieben wird) wird mit allen Oberflächen der benachbarten Körper

geschnitten, die aufgrund ihrer Ausdehnung in allen drei Dimensionen nahe genug liegen, um für eine Verdeckung in Frage zu kommen. Liegt der Schnittpunkt innerhalb der Berandung oder auf der Berandung, liegt eine Verdeckung vor, und die Blickrichtung kann verworfen werden (Abb. 26a). Falls der Schnittpunkt außerhalb der Berandung liegt oder die Fläche nicht schneidet, wird gefordert, daß der Winkel zwischen Sichtlinie und einer Strecke zwischen Objektpunkt und Oberfläche für keinen Oberflächenpunkt ein bestimmtes Maß überschreitet. Das bedeutet, daß um die Sichtlinie herum in einem Kegel mit dem Öffnungswinkel  $\alpha$  und Kegelspitze am Objektpunkt Verdeckungsfreiheit vorliegen soll (Abb. 26c).  $\alpha$  wird als Systemparameter vorgegeben. Damit wird verhindert, daß wie in Abb. 26b dargestellt, die Sichtlinie dicht an einer Oberfläche vorbeigeht. In diesem Fall kann wegen Ungenauigkeiten bei Rotation und Kippung sowie evtl. verschobenen Strukturen bei der praktischen Durchführung der Vermessung keine Verdeckungsfreiheit mehr gewährleistet werden. Ferner muß auch eine bestimmte Umgebung des Objektpunktes sichtbar sein, um die Mustererkennung durchführen zu können. Schließlich wird durch den Kegel auch verhindert, daß der Versuch unternommen wird, Geometrielemente in einem tiefen Einschnitt oder Graben zu erkennen.

Kanten werden zur Prüfung auf Sichtbarkeit in einzelne Punkte aufgeteilt. Die Kantenlänge kann als Maß für die Dichte dieser diskreten Punkte dienen. Sie erlaubt Rückschlüsse auf die Größenordnung der Vergrößerung, die erst später genau ermittelt wird, und damit auf die Auflösung, mit der die Berechnungen zur Feststellung der Sichtbarkeit zu erfolgen haben. Schließlich müssen die einzelnen Punkte nicht beliebig dicht liegen, da Verdeckungsfreiheit in der Umgebung der Punkte wegen des Kegels um die Blickrichtung vorliegt. Die Reihenfolge, in der die Punkte überprüft werden, kann so gewählt werden, daß bei den meisten Blickrichtungen nur einige wenige Punkte getestet werden müssen.

Die Verdeckungsprüfung wird in Parallelprojektion durchgeführt. Um die Berechnungen zur Verdeckungsprüfung in Zentralprojektion durchzuführen, muß der Aufsetzpunkt bekannt sein. Eine Optimierung des Aufsetzpunktes zur Verbesserung der Genauigkeit wäre dann aus Performancegründen nicht machbar. Der Fehler gegenüber der in der Realität vorliegenden Zentralprojektion ist bei hohen Vergrößerungen sehr gering und kann bei kleineren Vergrößerungen durch den Öffnungswinkel  $\alpha$  des Kegels um die Blickrichtungen kompensiert werden.

Nach der Wahl eines Aufsetzpunktes und einer Vergrößerung unter den o.g. Bedingungen erfolgt die Berechnung der erreichbaren Genauigkeit. Dabei wird die Operationsfolge und die Genauigkeit der darin eingehenden Größen berücksichtigt. Beim Auftrag **Distanz** und zwei Ecken als Bezugsobjekte ist das die Genauigkeit, mit der die Position der Ecken bestimmt werden kann sowie die Genauigkeiten der Vergrößerung und des Kippwinkels. Falls die 3D-Positionen der Ecken in Zentralprojektion bestimmt werden müssen, sind auch die Genauigkeit der Größe  $D$  (s. Gleichung (2.1)) sowie die Stabilität der Kippachse zu berücksichtigen. Aus der Genauigkeit, mit der die 3D-Positionen bestimmt werden können, ergibt sich schließlich die erreichbare Genauigkeit der Distanzmessung.

Der letzte Funktionsblock der Auftragsvorbereitung, **Muster erkennen**, wird für jeden Auftrag ausgeführt, der nicht wegen Verdeckungen im vorhergehenden Block abgewiesen wurde. Es werden für jedes Grundelement und beide Bilder Parameter berechnet, die die Merkmale des zu erkennenden Musters beschreiben. Anhand dieser Muster bzw. Merkmale des Musters wird bei der Vermessung die Erkennungsoperation für das betreffende Grundelement durchgeführt. Es gibt innerhalb des Funktionsblocks **Muster berechnen** für jeden Grundelementtyp eine Funk-

tion, die die Berechnungen für diesen Typ ausführt. Welche Parameter jeweils zu ermitteln sind, hängt von der noch zu wählenden Mustererkennungsmethode ab, mit der die Erkennungsoperation realisiert wird. Auch bei einem interaktiven System müssen dem Benutzer Muster vorgegeben werden. Jede dieser Funktionen berechnet auf alle Fälle die theoretische Lage des betreffenden Grundelements. Dadurch kann die Größe und Position eines Bildausschnittes angegeben werden, innerhalb dessen nach dem Muster für das Grundelement gesucht wird. Die Erkennungsoperation wird dadurch vereinfacht und beschleunigt.

Weitere Verfeinerungen der Konzeption betreffen einzelne Funktionen, die entweder vom Typ eines Meßauftrags oder vom Typ eines Geometrieelements abhängen. So ist z.B. für jeden Oberflächentyp eine Funktion erforderlich, die berechnet, ob ein Objektpunkt sichtbar ist oder nicht. Solche Funktionen sind jeweils dann festzulegen, wenn das Vermessungssystem um einen neuen Geometrieelementtyp oder um einen neuen Meßauftragstyp ergänzt werden soll.

Der Leistungsumfang des Systems kann folgendermaßen charakterisiert werden:

- Ein Meßauftrag kann immer dann durchgeführt werden, wenn alle Grundelemente in einem Stereobildpaar sichtbar sind.
- Der Stereokippwinkel ist für eine Meßreihe konstant; d.h. die Durchführbarkeit sowie die Genauigkeit können zwar durch die Wahl eines Blickrichtungspaars, aber nicht durch Variation des Kippwinkelunterschieds beeinflusst werden.
- Für Operationen mit mehreren Optionen für die Nachfolgeoperationen wird nur jeweils eine Option implementiert. Es gibt also auch keine Möglichkeit, Durchführbarkeit und Genauigkeit durch die Wahl zwischen verschiedenen Optionen zu beeinflussen. Ferner können entgegen der Darstellung in Abb. 25 Fälle auftreten, bei denen die Operationsfolge von der Blickrichtung abhängt, weil jeweils unterschiedliche Geometrieelemente erkannt werden müssen. In bezug auf die Operationsfolge und ihre Festlegung ist eine baldige Erweiterung der Systemkonzeption wünschenswert.
- Bezüglich der Arten von Meßaufträgen und Geometrieformen, die das System verarbeiten kann, ist der Leistungsumfang vom Stand der Implementierung abhängig. Das System kann genau dann um neue Auftrags- und Geometrieelementtypen erweitert werden, wenn für die vom Konzept des Grundsystems geforderten Funktionen geeignete Algorithmen zur Verfügung stehen.

### 3.7 Vermessung

In der Meßbeschreibung, die die Schnittstelle zwischen Vorbereitung und Vermessung bildet, stehen neben probenabhängigen REM-Parametern folgende Daten für jeden Meßauftrag bereit:

- Grunddaten des Meßauftrags (Bezugsobjekte, Sollgenauigkeit, Status<sup>1</sup>)
- auftragsabhängige REM-Parameter ( $\phi$ ,  $\theta_l$ ,  $\theta_r$ ,  $a$ ,  $M$ )

---

1. Der Status eines Meßauftrags gibt an, ob er mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden kann oder nicht oder ob er wegen Verdeckung oder Eingabefehlern (falsche Bezugsobjekte) zurückgewiesen wurde.



- Genauigkeit (für die Vermessung nicht relevant)
- Operationsfolge (Geometrieelemente, für die Operationen durchzuführen sind, mit Parametern, die auf die Geometrieelemente mit den Nachfolgeoperationen verweisen)
- Für jedes Bild Parameter, die die Merkmale der zu erkennenden Muster für jedes Grundelement beschreiben

Das Konzept für die Vermessung ist im Vergleich mit der Vorbereitung als automatische Meßablaufsplanung relativ einfach. Die in der Meßbeschreibung gelieferten Parameter können als Befehle an die Vermessung aufgefaßt werden, die den Ablauf der Vermessung festlegen. Dabei können zwei Kategorien von Befehlen unterschieden werden:

1. Befehle zur Steuerung des Rasterelektronenmikroskops sowie zum Bildeinzug und zur Bildvorverarbeitung: Die Gemeinsamkeit dieser Befehle ist, daß sie unabhängig vom Meßauftrag und den davon betroffenen Geometrieelementen sind. Die Parameter der Meßbeschreibung, die diese Befehle festlegen, sind die probenabhängigen und die auftragsabhängigen REM-Parameter.
2. Befehle zur Durchführung von Operationen gemäß der in der Meßbeschreibung beschriebenen Operationsfolge mit dem Ziel, die Meßgröße eines Auftrags zu bestimmen. Die Quelle der Operationsfolge ist die letzte der durchzuführenden Operationen und hängt vom Meßauftrag ab, während alle anderen Operationen von den davon betroffenen Geometrieelementen abhängen. Eine besondere Rolle kommt dabei den Erkennungsoperationen der Grundelemente zu. Zum einen werden zu ihrer Durchführung die Bilddaten benötigt. Zum anderen sind sie (zusammen mit der Bildvorverarbeitung aus 1.) Operationen, die nur mit einem sehr großen Entwicklungsaufwand automatisiert werden können (s. auch Kapitel 2.3).

Abb. 27 zeigt den Ablauf der Vermessung. Zu Beginn einer Meßreihe erfolgt das Einschleusen der Probe in die Probenkammer des Rasterelektronenmikroskops, die Einstellung der probenabhängigen REM-Parameter und die Berechnung einer Transformationsmatrix zur Umrechnung von Substrat- in Tischkoordinaten<sup>1</sup> (Funktionsblock **Voreinstellungen**). Alle Voreinstellungen sind Aufgabe der REM-Steuerung und werden von einzelnen Funktionen dieser Systemkomponente erledigt (vgl. auch Abb. 13, S.38). Die probenabhängigen REM-Parameter werden den REM-Steuerungsfunktionen als Steuerungsparameter übergeben.

Die Auftragsdurchführung erfolgt für jeden in der Meßbeschreibung vorhandenen Meßauftrag. Außer **Operationen durchführen** sind alle Funktionsblöcke unabhängig vom Auftrag und den betroffenen Geometrieelementen. Am Ende der Auftragsdurchführung werden die Grunddaten eines Meßauftrags sowie die ermittelte Meßgröße als Meßergebnisse ausgegeben (**Ausgabe**).

Im Block **Bildakquisition** wird über Funktionen der Systemkomponente REM-Steuerung die Einstellung der auftragsabhängigen REM-Parameter veranlaßt. Der Rotationswinkel  $\phi$ , die Kippwinkel  $\theta_l$  und  $\theta_r$ , der Aufsetzpunkt  $a$  und die Vergrößerung  $M$  werden als Steuerungspara-

---

1. Der Aufsetzpunkt  $a$  ist in der Meßbeschreibung in Substratkoordinaten angegeben.

meter übergeben. Die REM-Steuerung liefert die Daten eines Stereobildpaares bzw. eines Einzelbildes zurück. Die Bilddaten durchlaufen dann den Block **Bildvorverarbeitung**, der dem Block **Operationen durchführen** Kantenbilder bereitstellt.

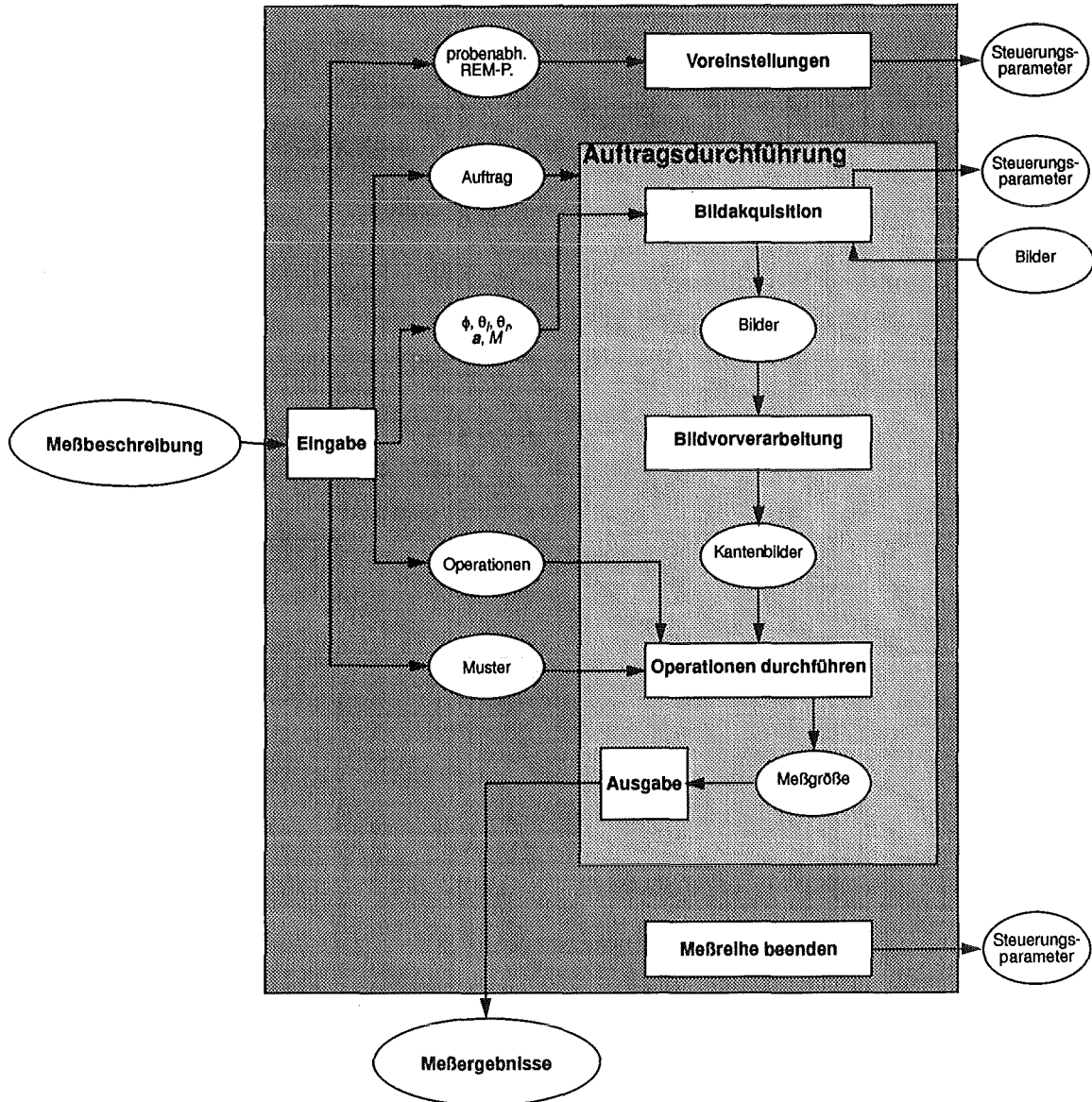


Abb. 27

Ablauf der Vermessung (dunkelgrauer Kasten):

Der Block **Auftragsdurchführung** (hellgrauer Kasten) wird für jeden von der Meßbeschreibung gelieferten Meßauftrag ausgeführt. Die Steuerung des REM zu Beginn und am Ende jeder Meßreihe sowie bei der Bildakquisition erfolgt über Funktionen der Systemkomponente REM-Steuerung durch Übergabe von Steuerungsparametern. Der Vermessungsablauf erfolgt hier vollautomatisch ohne Eingriff eines Benutzers.

Die Abarbeitung der Operationsfolge beginnt mit den Erkennungsoperationen der Grundelemente. Weitere Operationen sind die Berechnung von 2D-Parametern der Grundelemente in den Bildern, die Berechnung von 3D-Parametern über Projektionsrechnungen, Berechnung von Zwischengrößen und schließlich als Operation des Meßauftrags die Berechnung der Meßgröße.

Nach der Durchführung des letzten Meßauftrags einer Meßreihe wird im Block **Meßreihe beenden** über die REM-Steuerung das Rasterelektronenmikroskop in den Grundzustand versetzt und das Ausschleusen der Probe veranlaßt.

Abb. 27 stellt einen automatischen Vermessungsablauf dar, bei dem sämtliche Operationen zur Durchführung eines Meßauftrags von der Software durchgeführt werden. Dieser automatische Ablauf setzt voraus, daß eine zuverlässige Mustererkennung für alle Grundelementtypen implementiert ist. Bereits heute ist die Realisierung eines Vermessungssystems möglich, bei dem der Benutzer die Mustererkennungsoperationen interaktiv durchführt. In diesem Fall entfällt bei der Auftragsdurchführung der Bildvorverarbeitungsschritt. Die Erkennungsoperationen präsentieren dem Benutzer die REM-Bilder und jeweils eine Abbildung des zu erkennenden Musters. Der Benutzer bestimmt die Position von Ecken und den Verlauf der Kanten und liefert so das Ergebnis der Erkennungsoperation. Abb. 28 zeigt den entsprechenden Ablauf im Funktionsblock **Operationen durchführen**.

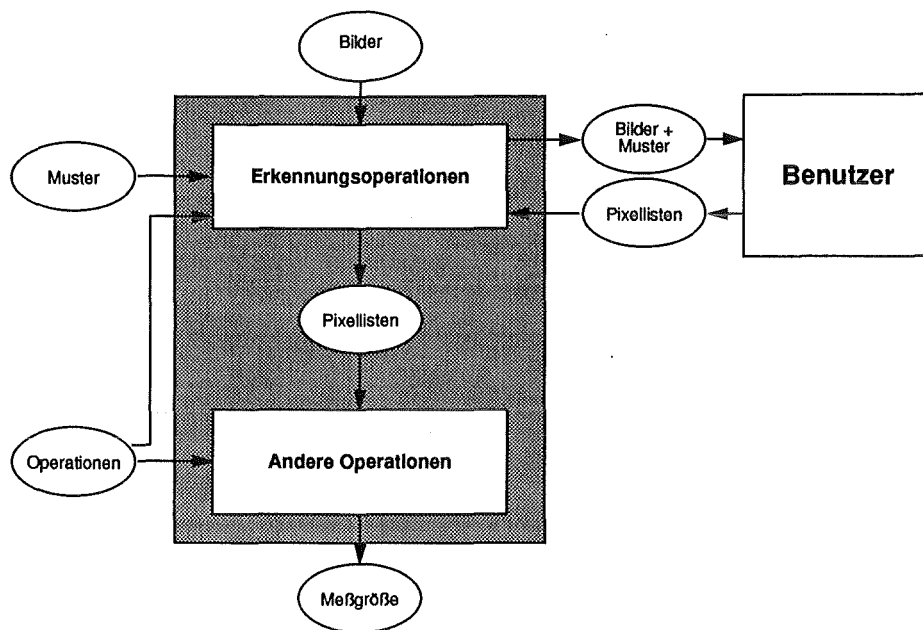


Abb. 28

*Interaktives Vermessungssystem:*

*Die Mustererkennung ist Aufgabe des Benutzers. Sie erfolgt direkt in den REM-Bildern. Der graue Kasten symbolisiert den Block **Operationen durchführen** der Auftragsdurchführung.*

In Kapitel 2.3 wurde darauf hingewiesen, daß zur Realisierung einer automatischen Mustererkennung auch Modelle diskutiert werden, wonach die Erkennungsoperationen in den Originalbildern durchgeführt werden können. In diesem Fall wird im Funktionsblock Bildvorverarbeitung keine Kantenextraktion durchgeführt und dem Block Operationen durchführen werden die (evtl. mit Methoden zur Verbesserung der Bildqualität bearbeiteten) Originalbilder übergeben.

### 3.8 REM-Steuerung

Die Systemkomponente REM-Steuerung erledigt alle bei der Vermessung anfallenden Steuerungsaufgaben bezüglich Mikroskop und Probestisch. Dadurch ist die Vermessung geräteunabhängig und das Vermessungssystem kann durch Austausch der REM-Steuerung (und der REM-Beschreibung für die Vorbereitung) an unterschiedliche Gerätetypen angepaßt werden. Aufgaben der REM-Steuerung sind:

- Einstellen von REM-Parametern
- Berechnung einer Transformationsmatrix
- Bildakquisition
- Ein- und Ausschleusen der Probe

Die REM-Steuerung enthält für jeden einzustellenden REM-Parameter und die übrigen Aufgaben jeweils eine Funktion, die entweder über Schnittstellen zum Rechner des Mikroskops eine automatische Durchführung der Steuerungsaufgaben vornehmen, oder, wenn dies nicht möglich ist, über eine Benutzerschnittstelle den Benutzer des Mikroskops zu einer entsprechenden Aktion veranlassen.

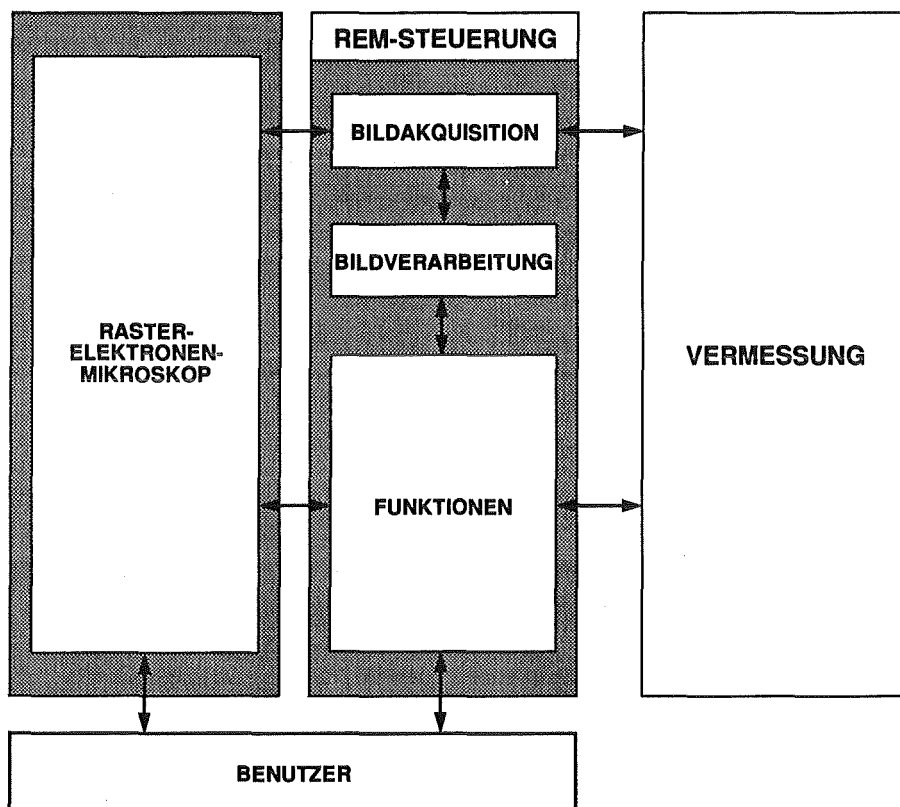


Abb. 29

Schematische Darstellung der Beziehungen zwischen REM-Steuerungsfunktionen, Rasterelektronenmikroskop, Benutzer und Vermessung:

Die Funktion zur Akquisition eines REM-Bildes ist gesondert dargestellt, da sie außer von der Vermessung auch von anderen Funktionen der REM-Steuerung benutzt wird, für die Bildverarbeitungsschritte notwendig sind. Eine REM-Steuerungsfunktion kann das Rasterelektronenmikroskop entweder automatisch steuern oder den Benutzer zu Aktionen am Mikroskop veranlassen.

In Abb. 29 sind die Beziehungen symbolisiert, die zwischen REM-Steuerungsfunktionen und dem Rasterelektronenmikroskop, der Systemkomponente Vermessung und dem Benutzer bestehen. Die Funktion zur Bildakquisition ist gesondert dargestellt. Bilder werden nicht nur von der Vermessung angefordert. Es können auch innerhalb einer REM-Steuerungsfunktion Bildverarbeitungs- und Mustererkennungsschritte nötig sein, wenn z.B. die Bestimmung der Transformationsmatrix automatisiert werden soll und dafür Orientierungsmarken auf dem Substrat detektiert werden müssen.

Die Funktionen der REM-Steuerung weisen einen unterschiedlich hohen Komplexitätsgrad auf. So ist z.B. zur Einstellung einer bestimmten Vergrößerung oder einer bestimmten Beschleunigungsspannung lediglich ein entsprechendes Kommando an den Mikroskoprechner zu übergeben. Zur Akquisition eines REM-Bildes sind jedoch mehrere Kommandos erforderlich: das Einscannen des Bildes mit einer bestimmten Scangeschwindigkeit muß veranlaßt werden, das Bild muß im Bildspeicher des Mikroskops gesichert, von dort wieder ausgelesen und dem externen Rechner übergeben werden.

Für ein automatisch arbeitendes Vermessungssystem muß das eingesetzte Mikroskop zumindest bei allen Steuerungsaufgaben, die während der Auftragsdurchführung anfallen, über einen externen Rechner gesteuert werden können. Dagegen können auch hier Steuerungsaufgaben zu Beginn und am Ende einer Meßreihe den Benutzer mit einbeziehen. Dies ist z.B. auf jeden Fall beim Ein- und Ausschleusen der Probe erforderlich. Moderne Rasterelektronenmikroskope sind mit einem Rechner und Softwarepaketen ausgerüstet, die eine Automatisierung wesentlich unterstützen. Damit ist jedoch eine volle Automatisierbarkeit, wie sie für das Vermessungssystem gefordert werden muß, nicht gewährleistet. So kann z.B. nicht davon ausgegangen werden, daß die automatische Fokussierung eines Mikroskops in jedem Fall eine ausreichende Bildqualität liefert. Die hier noch erforderlichen Entwicklungsarbeiten betreffen einzelne REM-Steuerungsfunktionen. Dadurch ist ein Bezugsrahmen vorgegeben, innerhalb dessen diese Arbeiten durchgeführt werden können.

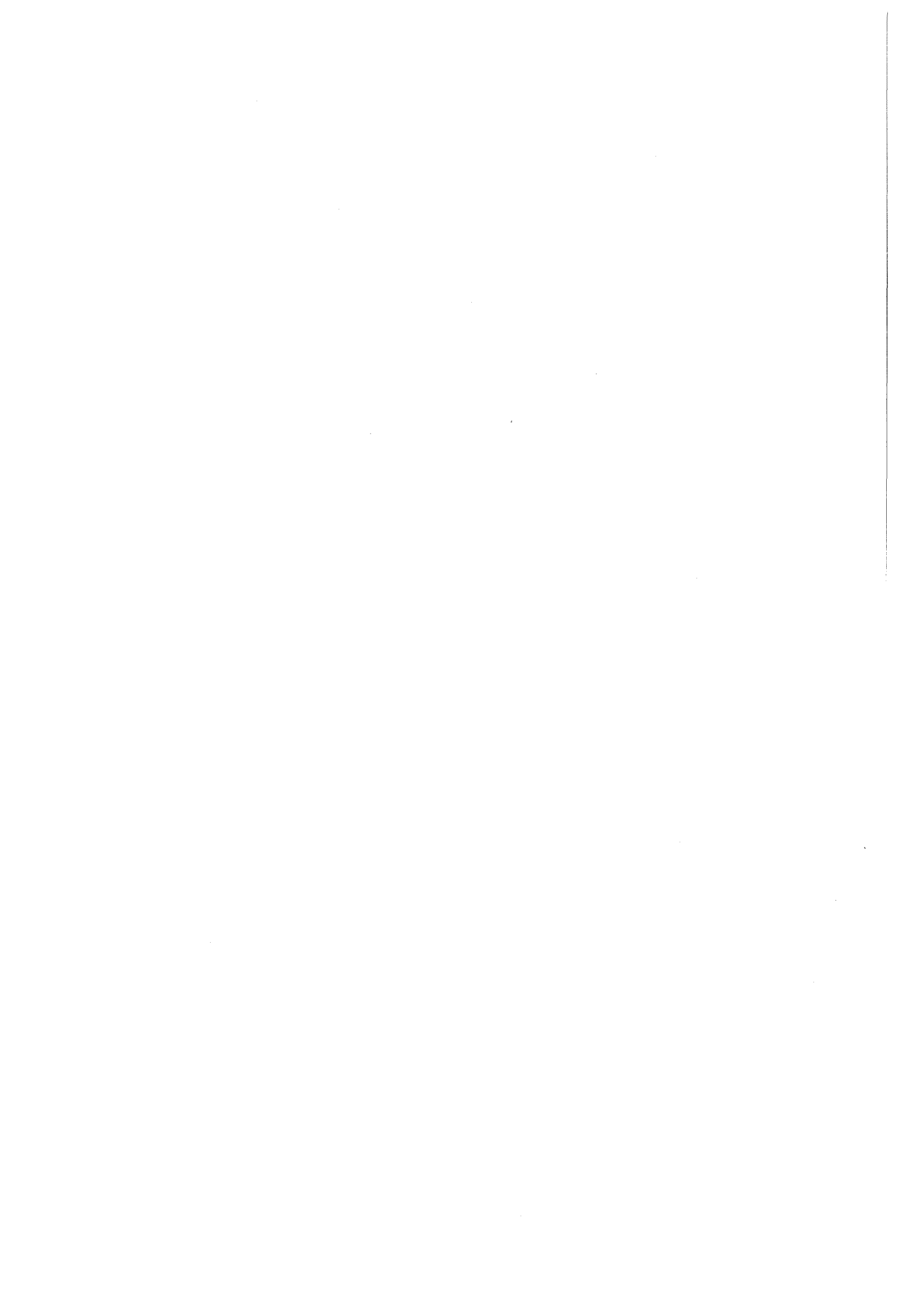
### 3.9 Auswertung

Die Meßergebnisse stellen lediglich eine Liste von Einzelaufträgen dar, die als Resultat der Vermessung eine Meßgröße enthalten, sofern sie durchgeführt werden konnten. Der Status eines Auftrags gibt an, ob er durchgeführt wurde, und wenn ja, ob die Meßgröße mit der erforderlichen Sollgenauigkeit ermittelt werden konnte. Die Meßaufträge sind weder nach Bezugsobjekten noch nach Typ oder Status sortiert. In dieser Form besitzen Meßergebnisse i. allg. noch keine Aussagekraft über die Qualität der Strukturen einer Probe. Eine weitere Systemkomponente, die Auswertung, hat die Aufgabe, dem Anwender Informationen zur Verfügung zu stellen, durch die er die gesamte Probe nach bestimmten Gesichtspunkten bewerten kann. Die genaue Funktionalität der Auswertung hängt vom Entwicklungsstand und dem Einsatzgebiet des 3D-Vermessungssystems ab und muß auf die Wünsche der Anwender abgestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll nur auf die Notwendigkeit dieser Komponente des Vermessungssystems hingewiesen und einige mögliche Funktionen exemplarisch genannt werden:

- Sortieren der Meßaufträge nach Typ, Status und Bezugsobjekten
- Ausgabe der Meßgröße einzelner Aufträge
- Erstellen von Statistiken
- Graphische Darstellung der Ergebnisse statistischer Berechnungen

- Vergleich mit Meßergebnissen anderer Proben
- Visualisierung der Meßergebnisse
- Eingabe von Kommentaren zu einzelnen Aufträgen oder zur gesamten Meßreihe
- Ausgabe von Informationen über die Gründe für nicht durchgeführte Aufträge
- Erstellen neuer Aufträge für zusätzliche Vermessungen oder Wiederholung von Aufträgen, die aufgrund falscher Angaben nicht durchgeführt wurden
- Erweitern und Korrigieren der bisherigen Meßauftragsliste für zukünftige Vermessungen gleichartiger Proben
- Überprüfung auf Einhaltung von Toleranzen bei einzelnen Meßaufträgen oder auch einer Reihe von Meßaufträgen, die sich z.B. auf geometrische Elemente einer bestimmten Struktur beziehen

Die Resultate der Auswertung sind komplexe Aussagen über die Qualität von Mikrostrukturen. Sie sind die endgültigen Ergebnisse des Vermessungssystems.



## 4 Objektorientierte Repräsentation

Ziel dieses Kapitels ist es, objektorientierte Methoden zur Repräsentation von Meßaufträgen und geometrischen Elementen vorzustellen und die Bedeutung eines solchen Ansatzes für die Entwicklung eines 3D-Vermessungssystems herauszuarbeiten. Für das System wurde der Anspruch erhoben, daß unterschiedliche Meßaufträge bei unterschiedlichen Geometrien bearbeitet werden können. Dabei wird fast jeder Meßauftrag vom Beginn der Vorbereitung bis zum Ende der Vermessung seine eigene, individuelle Behandlung erfahren. Sollten sich Aufträge weder in ihrem Typ noch im Typ ihrer Bezugsobjekte unterscheiden, treten i. allg. noch Unterschiede in der Lage der Bezugsobjekte im Raum und der Geometrie von Strukturen in der Umgebung der Bezugsobjekte auf. Es ist nicht möglich, alle diese Unterschiede in Form von Fallunterscheidungen zu berücksichtigen. Die Software würde sehr schnell unübersichtlich und Erweiterungen wären nur denkbar, wenn der gesamte Ablauf für alle nur möglichen auftretenden Fälle durchdacht wird. Objektorientierte Programmierung bietet hier die Möglichkeit, sowohl die zu verarbeitenden Daten als auch die Funktionalität des Systems so zu strukturieren, daß keine Fallunterscheidungen nötig sind und dennoch für jeden Meßauftrag die richtigen Funktionen in der richtigen Reihenfolge durchgeführt werden.

### 4.1 Begriffsdefinitionen

In diesem Abschnitt werden einige zentrale Begriffe der objektorientierten Programmierung erläutert [74][75]. Mit diesen Begriffen wird die objektorientierte Repräsentation von Meßaufträgen und der Strukturgeometrie im nächsten Abschnitt in einigen Grundzügen vorgestellt.

*Objekte* sind die Basiselemente in der objektorientierten Softwareentwicklung. Ihre Eigenschaften werden durch *Attribute* beschrieben. Diese Attribute können statischer Natur sein, d.h. es sind Variablen, in denen objektspezifische Daten gespeichert werden. Hier wird also der aktuelle Zustand des Objekts festgehalten. Ferner besitzen Objekte auch Attribute dynamischer Art, die *Methoden* genannt werden. Methoden sind Funktionen zur Durchführung von Berechnungen.

Ein weiterer wichtiger Begriff ist die *Klasse*. Eine Klasse beschreibt die Form von Objekten, die gleiche Eigenschaften besitzen, d.h. sie legt fest, welche statischen Attribute und welche Methoden Objekte besitzen, die zur Klasse gehören. Ein bestimmtes Objekt einer Klasse wird auch *Instanz* genannt. Klassen entsprechen den Datentypen wie z.B. Integer oder Character beim prozeduralen Programmierstil. Die einzelnen Objekte bzw. Instanzen einer Klasse entsprechen dann einer bestimmten Zahl oder einem bestimmten Zeichen und durch die Methoden ist festgelegt, welche Operationen mit der jeweiligen Klasse (Datentyp) durchgeführt werden können.

Beim objektorientierten Programmierstil werden die Objekte der realen Welt im Programm durch die Definition von Klassen beschrieben und als Instanzen dieser Klassen realisiert. Ein wesentlicher Teil der Softwareentwicklung besteht somit darin, neue Datentypen zu entwerfen. Hier zeigt sich einer der Vorteile des objektorientierten Programmierens. Einmal implementierte Klassen können auch bei weiteren Softwareprojekten verwendet werden, bei denen die gleichen Objekte auftreten. Ferner wird das Prinzip der *Datenabstraktion* unterstützt. In der Regel



kann nur auf bestimmte Methoden eines Objekts zugegriffen werden. Diese Methoden bilden die Schnittstelle eines Objekts nach außen. Nur über sie kann der Zustand des Objekts im Idealfall beeinflußt werden.

Einzelne Klassen existieren i. allg. nicht unabhängig voneinander. Die wichtigsten Beziehungen zwischen Klassen können in einer *Klassenhierarchie* dargestellt werden. Diese Hierarchie wird aufgebaut durch die *Ableitung* neuer Klassen (*Unterklassen*) aus bereits existierenden Klassen (*Oberklassen*). Klassen auf der obersten Ebene einer Hierarchie, die nicht ihrerseits aus einer Oberklasse abgeleitet sind, heißen *Basisklassen*. Die Eigenschaften der Oberklasse, d.h. ihre statischen Attribute und ihre Methoden, werden dabei an die Unterklassen weitergegeben. Dieses Prinzip heißt *Vererbung*. Zusätzlich zu den ererbten Eigenschaften können in einer Unterklasse weitere Eigenschaften definiert werden. Ferner können ererbte Methoden ergänzt oder vollständig überschrieben werden. Damit beschreiben Oberklassen gemeinsame Eigenschaften verschiedener Objektarten, während die unterschiedlichen, spezifischen Eigenschaften durch die Unterklassen beschrieben werden. Die Ableitung von Klassen und die Vererbung von Eigenschaften ermöglichen durch die damit verbundene *Spezialisierung* eine immer detailliertere Beschreibung der realen Welt. Es ist auch möglich, eine neue Unterklasse aus mehr als nur einer Oberklasse abzuleiten. Dadurch erhält die neue Klasse die Eigenschaften aller ihrer Oberklassen (*mehrfache Vererbung*)

Objektorientierte Software ist dadurch gekennzeichnet, daß während des Programmablaufs Objekte verschiedener Klassen erzeugt werden, die ihren Anfangszustand mit Hilfe ihrer Methoden verändern. Die Objekte beeinflussen sich gegenseitig durch das Senden von *Botschaften*. Dieser Vorgang ist nichts anderes als der Aufruf einer Methode und ist ähnlich einem Funktionsaufruf bei prozeduraler Programmierung. Es besteht allerdings ein sehr wesentlicher Unterschied. Während bei einem Funktionsaufruf genau festgelegt ist, welche Operationen durchzuführen sind, hängt dies beim Aufruf einer Methode von der Klasse ab, zu der das angesprochene Objekt gehört. Die Eigenschaft, daß unterschiedliche Objekte auf dieselbe Botschaft mit der Ausführung einer objektspezifischen Funktion reagieren, bezeichnet man als *Polymorphismus*. Damit entfallen bei der Programmierung in vielen Situationen Fallunterscheidungen, wodurch Programme übersichtlicher und leichter wartbar bzw. erweiterbar werden.

## 4.2 Anwendung beim 3D-Vermessungssystem

### Klassen für Meßaufträge und Geometrieelemente

Bereits bei der Konzeption des Vermessungssystems (Kapitel 3) wurden objektorientierte Ansätze berücksichtigt. Die Hierarchie von Geometrieelementtypen und Meßauftragstypen (Abb. 20, S.49 und Abb. 21, S.51) wird direkt in eine entsprechende Klassenhierarchie übertragen. Jeder einzelne Typ bildet eine Klasse. Die *ist*-Beziehungen sind als Ableitung einer Klasse aus einer Oberklasse realisiert. Für Meßaufträge bedeutet das, daß eine Klasse "Meßauftrag" als *Basisklasse* eingeführt wird, von der alle Meßauftragstypen als Unterklassen abgeleitet werden. Im Geometriemodell bildet eine Klasse "Geometrieelement" die Basisklasse, Haupttypen werden davon abgeleitet und weitere Untertypen sukzessive aus den Haupttyp-Klassen. Die in Kapitel 3.3 eingeführten Attribute sind als statische Attribute Bestandteil der internen Repräsentation von Objekten, auf die von außen i. allg. nicht zugegriffen werden kann. Sie sind entweder einfache Parameter (z.B. drei Koordinatenwerte für die Position eines Geometrieelements) oder

Objekte als Instanzen bestimmter Klassen (enthält-Beziehungen, z.B. die Kanten einer Oberfläche). Alle Funktionen des Vermessungssystems, die Geometrieinformationen oder Meßaufträge verarbeiten, sind als Methoden von Klassen realisiert. Die Struktur der beiden Klassenhierarchien für Meßaufträge und Geometrieelemente ist in Abb. 30 bzw. Abb. 31 dargestellt. Zur Erläuterung werden in den beiden folgenden Abschnitten einige wichtige Methoden sowie einige statische Attribute für diese Klassen vorgestellt. Durch Spezialisierung und Polymorphismus ist es möglich, typabhängige Funktionen von Meßaufträgen und Geometrieelementen durchzuführen, ohne daß der genaue Typ beim Aufruf der Methoden bekannt sein muß. Ferner kann das Prinzip der mehrfachen Vererbung im geometrischen Bereich sinnvoll eingesetzt werden.

### Methoden für die Meßauftragsklassen

Jede Meßauftragsklasse erhält zwei Methoden, die die Schnittstelle nach außen bilden. Diese beiden Methoden sind analog zu den Funktionsblöcken **Auftragsvorbereitung** der Systemkomponente Vorbereitung und **Auftragsdurchführung** der Komponente Vermessung. Sie sind Attribute der Basisklasse "Meßauftrag" und werden an die Unterklassen, die spezielle Meßauftragstypen darstellen, vererbt. Bei der Vorbereitung bzw. Vermessung wird, ohne daß der Typ eines Meßauftrags bekannt sein muß, eine Botschaft an das entsprechende Meßauftragsobjekt gesendet, um die Meßablaufsplanung bzw. die Auftragsdurchführung einzuleiten. Konkret heißt das, die Methoden "vorbereiten" bzw. "durchführen" werden aufgerufen. Innerhalb dieser Methoden übernehmen dann typspezifische Methoden den weiteren Ablauf (Spezialisierung). Statische Attribute, die jeder Meßauftrag besitzt, sind z.B. die auftragsabhängigen REM-Parameter und der Status.

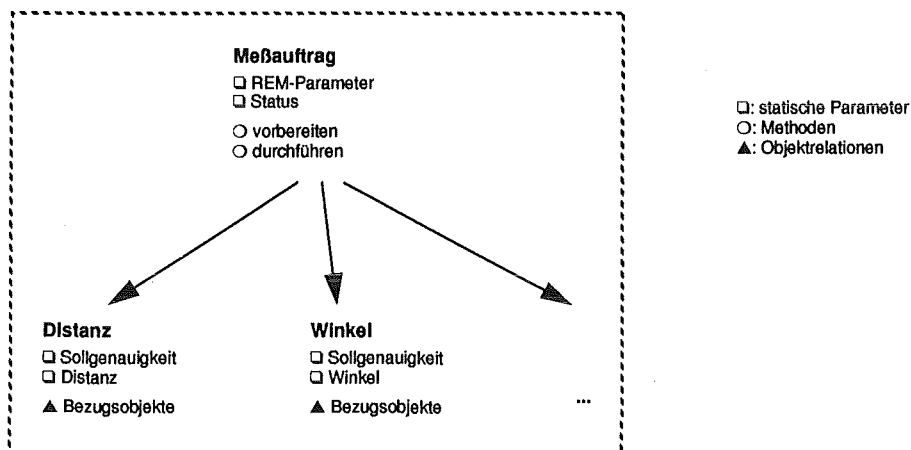


Abb. 30

*Klassenhierarchie für Meßaufträge:*

*Von einer Basisklasse Meßauftrag werden die Klassen für einzelne Meßauftragstypen abgeleitet (Pfeile). Sie erben die Attribute der Basisklasse und erhalten zusätzliche Attribute. Die beiden wichtigsten Methoden "vorbereiten" und "durchführen" sind typabhängig (Spezialisierung und Polymorphismus).*

Abb. 30 zeigt zwei von der Basisklasse "Meßauftrag" abgeleitete Klassen ("Distanz" und "Winkel") und die wesentlichsten Attribute. Die Bezugsobjekte sind Objekte von Geometrieelementklassen. Die Meßauftragsklassen sind mit den Geometrieelementklassen über diese *Objektrela-*

*tionen* verknüpft. Durch das spezielle Symbol ▲ soll ausgedrückt werden, daß es sich bei diesen Attributen um Objekte mit Methoden handelt, die von den Methoden eines Meßauftrags benutzt werden können.

### Methoden für Geometrieelemente

Genauso wie im Vorbereitungsprogramm (Vermessungsprogramm) der Typ eines Auftrags nicht bekannt sein muß, soll auch im Rahmen der Methoden der Meßaufträge nichts über die Typen der Bezugsobjekte bekannt sein. Auch dann, wenn eine Meßgröße und damit der Typ eines Auftrags nur für einen einzigen Geometrieelementtyp sinnvoll ist, wird diese Information nicht verwertet. So wird dann z.B. zum Festlegen der Operationsfolge eines Auftrags an die Bezugsobjekte die Botschaft gesendet, die Nachfolgeoperationen der Operation des Meßauftrags vorzubereiten. Die Bezugsobjekte wiederum versenden an weitere Geometrieelemente Botschaften, um weitere Nachfolgeoperationen vorzubereiten bis hin zur Vorbereitung der Erkennungsoperationen für die Grundelemente. Dem Meßauftrag wird lediglich bekanntgemacht, ob eine Operationsfolge erfolgreich vorbereitet wurde und welche Grundelemente in welchem Bild zu erkennen sind. Die Geometrieelemente müssen also Methoden besitzen, um Operationen vorzubereiten. Auf ähnliche Weise wird bei der Vermessung ein Auftrag durchgeführt. Dafür erhalten die Geometrieelemente Methoden, um Operationen durchzuführen.

Die Grundelemente (also Ecken und Kanten) erhalten Methoden zum Testen auf Sichtbarkeit. Ein Meßauftrag kann der Reihe nach für alle seine Grundelemente diese Methode für eine bestimmte Blickrichtung aufrufen. Auch hier muß im Bezugsrahmen des Meßauftrags nicht bekannt sein, um welche Grundelementtypen es sich dabei handelt. Damit die Grundelemente diese Methode durchführen können, muß für alle in einer vorgegebenen Umgebung liegenden Oberflächen festgestellt werden, ob diese einen bestimmten Objektpunkt verdecken. Eine entsprechende Methode wird von der Klasse Oberfläche bereitgestellt und kann unabhängig von deren Typ aufgerufen werden. Entsprechend der Unterklasse, zu der das angesprochene Oberflächenobjekt gehört, wird automatisch die richtige, typabhängige Funktion zur Verdeckungsprüfung ausgeführt (Polymorphismus). Weitere Beispiele für Methoden von Geometrieelementklassen sind Methoden für die Berechnung von Mustern für jede Grundelementklasse oder für jedes Geometrieelement und für jede seiner Operationen eine Methode, um die Genauigkeit, mit der die Operation durchgeführt werden kann, abzuschätzen. Ein Beispiel für ein statisches Attribut, das jedes Geometrieelement besitzt und das demzufolge bei der Basisklasse implementiert wird, ist die Position im Raum.

Die Attribute von Geometrieelementen können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

1. Parameter, die die Strukturgeometrie beschreiben und Methoden, die rein geometrische Manipulationen der Objekte ausführen. Hierzu gehören die aus Kapitel 3.3 bekannten Parameter und die Methoden zum Testen auf Sichtbarkeit (Ecken und Kanten) und für die Prüfung auf Verdeckung eines Objektpunktes (Oberflächen). Ferner gibt es noch eine Reihe bisher nicht genannter Methoden, wie z.B. die Rotation eines Geometrieelements um eine der Koordinatenachsen.
2. Parameter und Methoden, die von der Konzeption des Vermessungssystems gefordert werden, um Meßaufträge erfüllen zu können. Hierzu gehören Methoden zur Vorbereitung und Durchführung von Operationen, zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit von Operationen und zur Berechnung von Mustern (bei Ecken und Kanten).

Geometrische Beschreibung und Manipulationen können von den für die Vermessung notwendigen Eigenschaften von geometrischen Elementen getrennt werden. Dazu läßt sich das Prinzip der mehrfachen Vererbung nutzen. Das Geometriemodell wird als Klassenhierarchie implementiert und erhält Attribute der Kategorie 1. Von jeder Klasse, die einen vollständig spezifizierten Typ des Geometriemodells, wie z.B. ein Vieleck oder eine gerade Kante, beschreibt, wird eine weitere Klasse abgeleitet, die außerdem von einer Klasse "Meßelement" abgeleitet wird. Die Klasse "Meßelement" bildet die Schnittstelle für den Aufruf von Methoden der Kategorie 2. Das Vermessungssystem verwendet Objekte der Klassen des rein geometrischen Modells, wenn lediglich geometrische Manipulationen durchzuführen sind (z.B. Oberflächen, die auf Verdeckung zu prüfen sind) und Objekte der von der Klasse "Meßelement" abgeleiteten Klassen, wenn vermessungsrelevante Eigenschaften gebraucht werden (Bezugsobjekte und alle Objekte, für die Operationen durchzuführen sind).

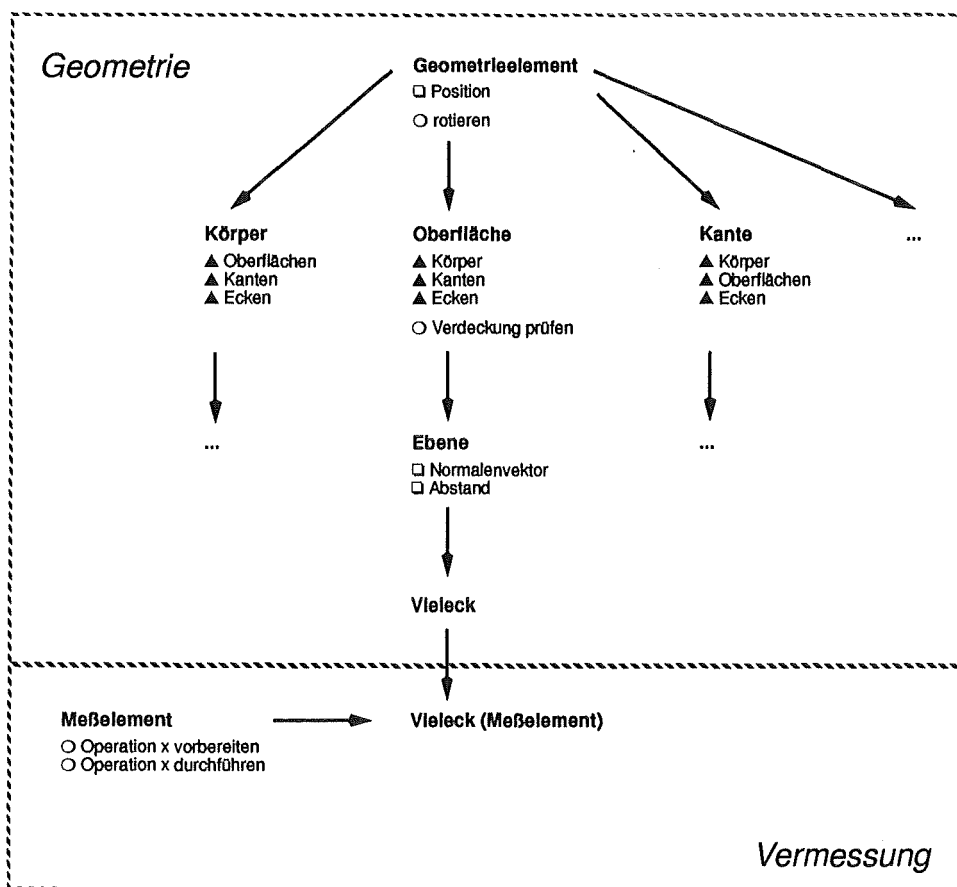


Abb. 31

Ausschnitt aus der Klassenhierarchie für Geometrielemente:

Im oberen Teil sind Klassen zur Beschreibung rein geometrischer Eigenschaften dargestellt.

Der untere Teil zeigt Klassen, die ausschließlich vom Vermessungssystem benutzt werden.

Die Pfeile symbolisieren Ableitungen. Die Symbole vor den Attributen sind in Abb. 30 erläutert.

In Abb. 31 ist ein Ausschnitt aus der Klassenhierarchie für geometrische Elemente dargestellt, wie sie innerhalb des Vermessungssystems verwendet wird. Auch hier sind nur einige wesentliche Attribute enthalten, die als Beispiele dienen sollen und aus den bisherigen Ausführungen bekannt sind. Die Pfeile stehen für Ableitungen. Ein Objekt der Klasse "Vieleck (Meßelement)"

besitzt hier alle Eigenschaften der Klasse "Meßelement" und sämtlicher Oberklassen aus dem geometrischen Teil der Klassenhierarchie. Das Objekt kann rotiert werden, es kann eine Verdeckungsprüfung durchgeführt werden und eine Operation  $x$  (z.B. die Operation 3D-Position bestimmen) kann vorbereitet und durchgeführt werden, auch wenn der genaue Typ des Objekts nicht bekannt ist.

### 4.3 Vorteile der objektorientierten Programmierung

Der Leistungsumfang eines 3D-Vermessungssystems kann charakterisiert werden durch die Geometrieformen, die verarbeitet werden können und die Vermessungen, die sich an diesen Geometrieformen ausführen lassen. Im Prinzip kann ein System konzipiert und realisiert werden, indem bestimmte Geometrieformen (z.B. Polyeder) gewählt werden und eine Liste von Vermessungswünschen der potentiellen Anwender zusammengestellt wird. Die benötigten geometrischen Elemente und auch die Meßaufträge sind dann überschaubar. Da jedoch die 3D-Welt weitaus vielfältiger ist als eine Polyederwelt und bereits beim LIGA-Verfahren gekrümmte Oberflächen auftreten, wurde generell gefordert, daß ein 3D-System hinsichtlich Geometrieformen und Meßaufträgen erweiterbar sein muß und genau diese Erweiterbarkeit wird durch objektorientierte Methoden wesentlich unterstützt.

Als Beispiel sei die Aufgabe gestellt, eine Ecke auf Sichtbarkeit zu testen. Dafür sind alle in einer gewissen Umgebung der Ecke liegenden Flächen zu prüfen, ob sie die Ecke verdecken. Ohne Objektorientierung muß für jede Fläche eine Typüberprüfung stattfinden und je nach Ergebnis dieser Überprüfung ist dann eine spezielle Funktion für den ermittelten Typ aufzurufen. Wird ein neuer Oberflächentyp eingeführt, muß der Programmcode für die Typüberprüfung entsprechend ergänzt werden. Sind dagegen Oberflächen als Klassen implementiert, die von einer gemeinsamen Oberklasse abgeleitet wurden, ist keine Typüberprüfung nötig. Für die Prüfung auf Verdeckung wird einfach eine entsprechende Botschaft an ein Oberflächenobjekt gesendet und die Methode für den speziellen Typ dieser Oberfläche wird wegen des Polymorphismus automatisch ausgeführt, also auch für ein Objekt einer neu hinzugefügten Klasse. Der Programmcode zum Testen einer Ecke auf Sichtbarkeit muß nicht ergänzt werden, wenn ein neuer Oberflächentyp eingeführt wird, weil keine Fallunterscheidungen nötig sind.

Für Erweiterungen um neue Geometrieformen oder neue Meßaufträge kann ein Schema vorgegeben werden, dessen grobe Züge in den beiden folgenden Abschnitten beschrieben werden. Dieses Schema kann zu einer detaillierten Anleitung ausgearbeitet werden, mit deren Hilfe eine rasche und übersichtliche Implementierung von zusätzlicher Funktionalität für das Vermessungssystem ermöglicht wird.

#### Erweiterung um einen neuen Geometrieelementtyp

Um einen neuen Geometrieelementtyp einzuführen, wird eine neue Klasse definiert und von einer der bereits bestehenden Klassen abgeleitet. Die neue Klasse erbt die Attribute aller Oberklassen. Methoden, die vom Typ des neuen Geometrieelements abhängen, müssen neu implementiert werden. Die neue Klasse erhält i. allg. auch neue Attribute, z.B. Parameter für die mathematische Beschreibung von Objekten im 3D-Raum bei Oberflächen und Kanten.

### **Erweiterung um einen neuen Meßauftragstyp**

Es wird eine neue Klasse von der Klasse "Meßauftrag" abgeleitet. Die Methoden zur Vorbereitung und Durchführung des Auftrags sind neu zu implementieren. Bei der Einführung eines neuen Meßauftrags sind z.T. auch Ergänzungen bei der Klasse "Meßelement" und den davon abgeleiteten Geometrieelementklassen notwendig. Hier sind neue Methoden hinzuzufügen, um bisher nicht implementierte Operationen, die vom neuen Meßauftrag benötigt werden, vorzubereiten, durchzuführen und um Genauigkeiten für die Ergebnisse dieser Operationen zu berechnen.

Die bei einer Erweiterung notwendigen Entwurfs- und Programmierarbeiten beschränken sich in jedem Fall auf ganz bestimmte Klassen des Meßauftrags- und/oder Geometriemodells.

Die objektorientierte Sichtweise und Programmierung bietet allgemein noch einen weiteren Vorteil für Softwareentwickler. Dies betrifft den Aspekt der Wiederverwendbarkeit von Software. Der rein geometrische Teil der Klassenhierarchie für Geometrieelemente kann auch bei anderen Projekten, bei denen die dreidimensionale Geometrie eine Rolle spielt, verwendet werden. Hier liegt einer der wesentlichsten Gründe für die Entscheidung, die Klassenhierarchie mit Hilfe mehrfacher Vererbung in einen geometrischen und einen für die Vermessung relevanten Teil zu zerlegen.

Zum Abschluß der Diskussion der Bedeutung der objektorientierten Repräsentation soll noch einmal der Leistungsumfang betrachtet werden, soweit er durch die im System vertretenen Geometrieformen und Meßaufträge charakterisiert ist. Ein Anwender wird hier nicht immer den maximalen Leistungsumfang des Systems benötigen. Wenn er z.B. nur Polyederstrukturen hat, wird er keine gekrümmten Geometrieelemente benötigen und auch nur diejenigen Meßaufträge, die für Polyeder sinnvoll sind. In diesem Fall können einfach alle nicht benötigten Klassen aus dem System herausgenommen werden. Der Leistungsumfang läßt sich flexibel auf die Bedürfnisse eines Anwenders abstimmen.



## 5 Implementierung

### 5.1 Programmiersprache und verwendete Software

Die Implementierung erfolgte in der Programmiersprache C++. Diese Sprache ist eine Weiterentwicklung der Programmiersprache C. Sie unterstützt die in Kapitel 4 vorgestellten objektorientierten Konzepte, d.h. Definition von Klassen, Vererbung, Polymorphismus und Spezialisierung.

Neben Standardbibliotheken von C++ wurde zur Implementierung von Listenklassen die Bibliothek LEDA (Library of Efficient Data types and Algorithms) verwendet [76]. Die Haupttypklassen der Geometrielemente enthalten Listen als Attribute zur Aufnahme derjenigen Objekte, zu denen eine enthält- oder gehört zu-Beziehung besteht. Ferner enthalten Ecken und Kanten eine Liste mit Oberflächen, die nah genug liegen, um für eine Verdeckung des jeweiligen Grundelements in Frage zu kommen.

Zur Visualisierung der Ergebnisse der Vorbereitung wurde die Public Domain - Software *mtv-Raytracer* benutzt, die mit dem Strahlverfolgungsverfahren arbeitet [65]. Damit können synthetische Bilder von Polyederstrukturen aus beliebiger Blickrichtung und unter beliebiger Vergrößerung erzeugt werden. Ferner wurden zur Visualisierung und zur Kantenextraktion in synthetischen Bildern Teile des Softwarepaketes KHOROS verwendet [77].

### 5.2 Umfang der bisher implementierten Software

#### Geometrie

Es wurden die in Abb. 16, S.44, dargestellten Geometrieelementtypen als Klassen implementiert mit Ausnahme der Möglichkeit, imaginäre Geometrielemente zu erzeugen. Damit lassen sich alle Polyeder beschreiben, die von einfach zusammenhängenden Flächen begrenzt werden<sup>1</sup>.

#### Meßaufträge

Es wurden die beiden Meßauftragsklassen "Distanz" und "Winkel" implementiert. Zur Zeit sind Distanzmessungen nur zwischen Ecken und Winkelmessungen nur zwischen geraden Kanten möglich.

#### Vorbereitung

Die Vorbereitung ist in der Lage, die Auftragsbearbeitung für die beiden implementierten Meßauftragstypen mit den o.g. Bezugsobjekten durchzuführen. Es erfolgt noch keine explizite Fest-

1. Im Prinzip könnten auch Polyeder mit mehrfach zusammenhängenden Oberflächen beschrieben werden. Allerdings müssen dann Kanten angegeben werden, die nicht als reale Strukturkanten existieren, um ebene Oberflächen in mehrere Teilflächen zu zerlegen. Dies widerspricht den Prinzipien der in Kapitel 3.3 dargelegten Konzeption zur Beschreibung der Strukturgeometrie.



legung der Operationsfolge. Aus diesem Grund können die beiden Meßauftragstypen nur auf bestimmte Geometrieelementtypen bezogen werden (die Meßaufträge sind von den Typen der Bezugsobjekte abhängig). Trotzdem erfüllt die vorliegende Version alle Anforderungen der Konzeption. Sie ist in der Lage, jeden beliebigen Auftrag (der beiden implementierten Typen) für beliebige Polyederstrukturen vorzubereiten. Es wird jeweils ein Satz von auftragsabhängigen REM-Parametern bestimmt, so daß ein Auftrag mit maximaler Genauigkeit oder einer geforderten Sollgenauigkeit durchgeführt werden kann. Als Ersatz für Muster, die erst dann berechnet werden können, wenn Algorithmen zur automatischen Mustererkennung festgelegt worden sind, wird für jede zu erkennende Ecke die theoretische Position im Bild berechnet (ein Parameter, der in jedem Fall bei der Musterberechnung festgelegt werden muß).

Systemparameter werden aus einer Datei eingelesen. Die vorliegende Programmversion benötigt folgende Parameter:

- Maximale Strukturhöhe und maximale laterale Strukturabmessung (Probenparameter). Diese beiden Parameter werden benutzt, um eine Umgebung um ein Grundelement festzulegen, innerhalb welcher Oberflächen beim Testen auf Sichtbarkeit berücksichtigt werden müssen.
- Anzahl der Pixel pro Bildzeile und Bildgröße (REM-Beschreibung). Es wird davon ausgegangen, daß quadratische Bilder mit quadratischen Pixeln vorliegen. Im allgemeinen Fall sind REM-Bilder rechteckig. Ferner kann nicht immer davon ausgegangen werden, daß die Pixel der digitalisierten Bilder im Rasterelektronenmikroskop quadratisch sind. Hier ist jedoch zu fordern, daß die Bilder von der REM-Steuerung mit quadratischen Pixeln geliefert werden.
- Maximal einstellbarer Kippwinkel am Probenstisch (entspricht i. allg. der maximalen Verkippung des Probenstisches, kann aber bei großen Substraten eingeschränkt sein).
- Abstand zwischen Projektionszentrum und Substratebene (Parameter  $D$  in den Zentralprojektionsformeln (2.1)). Diese Größe entspricht dem Arbeitsabstand plus einer experimentell zu ermittelnden Konstanten.
- Stereokippwinkel. Für alle Meßaufträge einer Meßreihe wird derselbe Stereokippwinkel gewählt.
- Parameter, mit dem die Dichte der Blickrichtungen, aus denen eine Auswahl getroffen werden kann, festgelegt wird ( $\theta_S$ , s. auch die Ausführungen in Kapitel 5.3).
- Öffnungswinkel des frei einsehbaren Kegels um eine Blickrichtung.
- Bildausnutzungsfaktor. Grundelemente sollen nicht über das gesamte Bild verteilt werden. Der Bildausnutzungsfaktor bestimmt den Anteil des gesamten Bildes, der tatsächlich ausgenutzt wird.
- Genauigkeiten von Eingabegrößen. In der implementierten Version werden zur Genauigkeitsabschätzung die Ungenauigkeiten folgender Eingabegrößen für Projektionsrechnungen berücksichtigt: Kippwinkel, Vergrößerung,  $D$ , Pixelgenauigkeit (gibt an, mit welcher Genauigkeit die Position einer Ecke im Bild bestimmt werden kann).

## Visualisierung

Die Vorbereitung wurde mit einer Möglichkeit zur Visualisierung der Resultate (auftragsabhängige REM-Parameter) versehen. Zu diesem Zweck wird ein Programm zur Strahlverfolgung

(Raytracer) verwendet. Für jeden Auftrag werden die zu vermessenden Strukturen in einem Stereobildpaar so abgebildet, wie sie in einem idealen Rasterelektronenmikroskop unter idealen Verhältnissen bei den von der Vorbereitung gelieferten auftragsabhängigen REM-Parametern zu sehen sind.

Die Visualisierung der Ergebnisse der Vorbereitung ist ein wichtiger Bestandteil der bisher entwickelten Software. Ohne sie ist die weitere Entwicklung des Vermessungssystems nicht denkbar. Die Bedeutung der von der Vorbereitung gelieferten Zahlenwerte ist gedanklich nur schwer nachvollziehbar. Schon allein das Testen der für die Vorbereitung implementierten Software ist ohne die dargestellten Bilder unmöglich. So ist z.B. auf den ersten Blick zu erkennen, ob alle benötigten Grundelemente tatsächlich sichtbar sind und es läßt sich abschätzen, ob der geforderte Kegel um die Blickrichtung tatsächlich frei einsehbar ist. Ferner ist es möglich, die Position einzelner Pixel in den Bildern abzulesen, so daß die Richtigkeit der bei der Musterberechnung ermittelten theoretischen Eckenpositionen überprüft werden kann.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, an den berechneten Bildern den Ablauf der Vermessung zu simulieren (s. nächster Abschnitt). Bei der weiteren Systementwicklung wird die Visualisierung ebenfalls eine große Rolle spielen. So können etwa bei der Implementierung der Systemkomponente Vermessung zum Einsatz an einem realen Rasterelektronenmikroskop die theoretischen Bildausschnitte mit denen verglichen werden, die man am Mikroskop erhält. Daraus lassen sich Rückschlüsse für den Entwurf von REM-Steuerungsfunktionen, insbesondere zum Verfahren des Probentisches und zur Fokussierung, ableiten. Ziel ist es hier, daß die tatsächlichen Bildausschnitte den idealen möglichst nahe kommen.

### **Simulation der Vermessung**

Bei den beiden Meßauftragsklassen wurde je eine Methode zur Simulation des Vermessungsablaufs implementiert. Anstelle der Bildakquisition am Rasterelektronenmikroskop werden die von der Visualisierung berechneten Bilder dargestellt. Eine KHOROS-Routine führt eine Kantenextraktion durch. In den Kantenbildern können die Eckenpositionen bestimmt und dem Simulationsprogramm übergeben werden. Aus diesen Eckenpositionen werden dann die jeweiligen Meßgrößen berechnet. Die Genauigkeit dieser simulierten Vermessung ist hier nur von der Pixelauflösung und von der Genauigkeit, mit der die Eckenpositionen bestimmt werden, abhängig. Die durchgeführten simulierten Vermessungen lassen Rückschlüsse auf die tatsächlich erreichbaren Genauigkeiten zu. Um diese Vermessungssimulation ebenso vielseitig wie die Visualisierung als Hilfe bei den zukünftigen Entwicklungsarbeiten einzusetzen, ist es wünschenswert, daß die dabei verwendeten Bilder im Gegensatz zu den aus der Visualisierung stammenden, auch mit definierten Ungenauigkeiten der in die Berechnungen eingehenden REM-Parameter belegt werden können. In Kapitel 5.4 wird eine simulierte Distanzmessung an einer Teststruktur vorgestellt. Ferner wurden auch reale Vermessungen am Rasterelektronenmikroskop durchgeführt.

Eine detailliertere Beschreibung von Vorbereitung, Visualisierung und Vermessungssimulation erfolgt im Anhang.

### 5.3 Algorithmen

In diesem Kapitel werden folgende für die Planung des Meßablaufs wesentliche Algorithmen beschrieben:

- Berechnung von Blickrichtungen
- Algorithmus zum Testen der Sichtbarkeit von Grundelementen (für Ecken)
- Algorithmus zur Prüfung auf Verdeckung eines Objektpunktes (für Vielecke)
- Optimierung des Aufsetzpunktes

Ferner wird auf die Berechnungen zur Abschätzung der Genauigkeit eingegangen.

#### Blickrichtungen

Es wird gefordert, daß die Blickrichtungen, die der Auftragsvorbereitung zur Auswahl vorgegeben werden, im maximal einsehbaren Raumwinkelement in etwa gleichverteilt sind. Die Dichte und damit die Anzahl zu testender Blickrichtungen soll über einen Systemparameter festgelegt werden können. Dadurch kann der Zeitaufwand für die Vorbereitung einer Meßreihe beeinflußt werden. Wenn beispielsweise bekannt ist, daß sich auf einem Substrat nur freistehende, konvexe Strukturen befinden, reicht eine geringe Zahl von Blickrichtungen aus, weil die Möglichkeiten für Verdeckungen gering sind. Jeder Blickrichtungsvektor ist ein Einheitsvektor in Substratkoordinaten und entspricht in Polarkoordinaten einem Azimutwinkel  $\phi$  (Rotationswinkel) und einem Polarwinkel  $\theta$  (Kippwinkel). Der zweite Blickrichtungsvektor eines Paares (rechts) ergibt sich aus dem ersten (links) durch Addition des Stereokippwinkels  $\Delta\theta$  zum Polarwinkel. Der erste Blickrichtungsvektor ist  $(0,0,1)$ , d.h.  $\phi = 0$  und  $\theta = 0$ . Alle weiteren Vektoren liegen auf Breitenkreisen mit dem konstanten Winkelabstand  $\theta_S$ . Die Anzahl der Vektoren auf dem  $n$ -ten Breitenkreis, vom Pol aus gezählt, ist  $4n$  und sie sind auf dem Breitenkreis gleichmäßig verteilt. Die maximale Anzahl von Breitenkreisen  $n_{max}$  kann durch folgende Bedingung bestimmt werden:

$$\theta_S n_{max} \leq \theta_{max} - \Delta\theta \quad (5.1)$$

$\theta_{max}$ : maximaler Kippwinkel

Daraus ergibt sich die Gesamtzahl von Blickrichtungen  $N$ :

$$N = 1 + 4 \sum_{n=1}^{n_{max}} n = n_{max}^2 + (n_{max} + 1)^2 \quad (5.2)$$

Die Dichte der Blickrichtungen kann durch Variation von  $\theta_S$  als Systemparameter beeinflußt werden. Zusätzlich zu den Richtungsvektoren links und rechts werden auch der entsprechende Rotationswinkel  $\phi$  und die Kippwinkel  $\theta_l$  und  $\theta_r$  berechnet. Der Wert für  $\phi$  unterscheidet sich von dem Wert, der bei der Vermessung am Probestisch eingestellt werden muß. Dieser hängt von der Drehrichtung des Tisches, der Lage der Kippachse, der Kipprichtung und der Ausrichtung der Probe auf dem Probestisch ab. Die Umrechnung ist eine Aufgabe der REM-Steuerungsfunktion zur Rotation des Probestisches.

In Abb. 32 sind die Ergebnisse für die Fälle  $\theta_{max} = 70^\circ$ ,  $\theta_S = 8^\circ$  (a) und  $\theta_{max} = 50^\circ$ ,  $\theta_S = 5^\circ$  (b) visualisiert. Die große dunkle Kugel ist eine Einheitskugel um den Koordinatenursprung, die kleinen hellen Kugeln stellen die Endpunkte der vom Ursprung ausgehenden Blickrichtungsvektoren (links) dar. Der Vektor  $(0,0,1)$  ist durch einen Pfeil gekennzeichnet. Im Fall a ist  $N = 113$ , im Fall b ist  $N = 145$ .

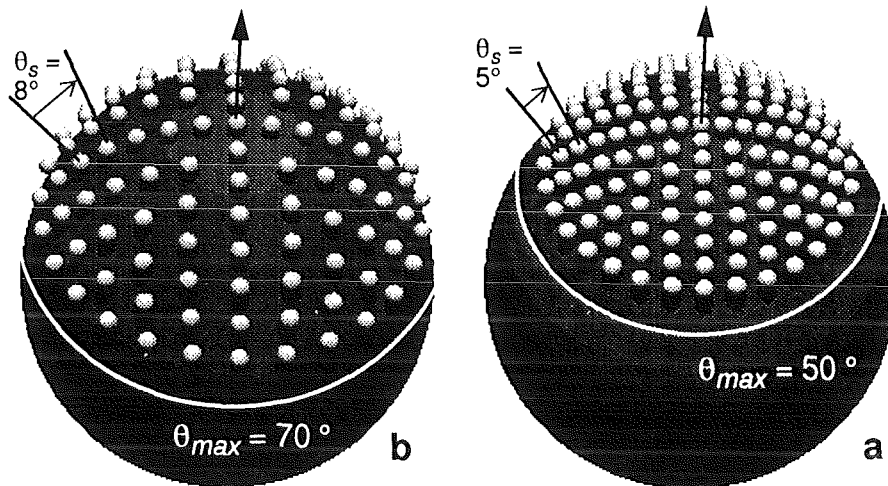


Abb. 32

Blickrichtungen (a:  $\theta_{max} = 70^\circ$ ,  $\theta_S = 8^\circ$ ; b:  $\theta_{max} = 50^\circ$ ,  $\theta_S = 5^\circ$ )

Dargestellt sind die Endpunkte der vom Ursprung ausgehenden Einheitsvektoren als kleine helle Kugeln auf der Einheitskugel. Der Pfeil kennzeichnet die Richtung  $(0,0,1)$ . Die Blickrichtungen sind unabhängig von Anzahl und Dichte annähernd gleichmäßig verteilt.

## Sichtbarkeit

Jedes Grundelement erhält eine Methode zum Prüfen auf Sichtbarkeit. Sie bildet die Schnittstelle zwischen den Meßaufträgen und der Strukturgeometrie, um eine der grundlegendsten Aufgaben der Vorbereitung, nämlich die Verdeckungsprüfung, zu erfüllen. Im Rahmen eines Meßauftrags ist lediglich ein Aufruf dieser Methode für jedes Grundelement erforderlich. Die eigentliche Verdeckungsprüfung ist vollständig durch Methoden von Geometrieelementklassen realisiert. Insbesondere ist dadurch bei der Einführung eines neuen Auftragstyps keine zusätzliche Programmierung im Hinblick auf die Verdeckungsprüfung erforderlich. Bei den beiden bisher implementierten Meßaufträgen sind jeweils nur Ecken zu erkennen. Obwohl eine entsprechende Methode auch für gerade Kanten implementiert ist, wird hier nur die Methode für Ecken diskutiert. Ecken besitzen als Attribut eine Liste mit Oberflächen, die für eine Verdeckung in Frage kommen und für die eine Verdeckungsprüfung durchgeführt werden muß (s. unten). Diese Oberflächen liegen lateral innerhalb eines Suchradius  $r$  um die  $x,y$ -Position einer Ecke der durch

$$r = l_{max} + h_{max} \tan(\theta_{max} + \alpha) \quad (5.3)$$

- $l_{max}$ : maximale laterale Strukturausdehnung
- $h_{max}$ : maximale Strukturhöhe
- $\theta_{max}$ : maximaler Kippwinkel
- $\alpha$ : Öffnungswinkel des Kegels um Blickrichtung

gegeben ist (vgl. Abb. 33). Diese Berechnung geht davon aus, daß die Lateralausdehnung einer Fläche nicht größer sein kann, als die Lateralausdehnung des Körpers, zu dem sie gehört, die wiederum kleiner oder gleich der maximalen Lateralausdehnung aller Körper auf dem Substrat ist. Ferner wird angenommen, daß die Ecke bei  $z = 0$ , also auf der Substratoberfläche liegt.

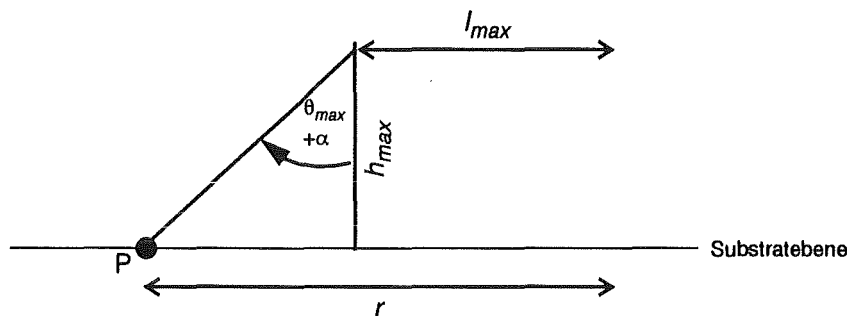


Abb. 33

Um den Suchradius zu bestimmen, innerhalb dessen Oberflächen auf Verdeckung eines Objektpunktes P zu prüfen sind, wird angenommen, daß:

1. die Oberflächen die maximale Lateralausdehnung  $l_{max}$  haben und
2. der Objektpunkt P in der Substratebene ( $z=0$ ) liegt.

In der Methode zur Prüfung auf Sichtbarkeit einer Ecke wird für die in der Liste enthaltenen Oberflächen die Methode zur Verdeckungsprüfung ausgeführt. Sobald für eine Oberfläche eine Verdeckung festgestellt wird, ist die Ecke nicht sichtbar; wenn für alle Oberflächen Verdeckungsfreiheit vorliegt, ist die Ecke sichtbar. Damit nicht in jedem Fall für alle diese Oberflächen die Verdeckungsprüfung, die sehr zeitaufwendig ist, durchgeführt werden muß, ist zu jeder Oberfläche ein Grenzwinkel  $\theta_{gr}$  angegeben. Dieser Winkel gibt, je nach Abstand der Fläche zur  $x,y$ -Position der Ecke, den kleinsten Kippwinkel an, für den die Fläche berücksichtigt werden muß.

Der hier beschriebene erste Ansatz für eine Auswahl von auf Verdeckung zu prüfenden Oberflächen kann in dreifacher Hinsicht verbessert werden:

1. Die tatsächliche  $z$ -Position einer Ecke wird berücksichtigt. Dadurch vermindert sich der Suchradius  $r$ , da in (5.3)  $h_{max} - z$  statt  $h_{max}$  eingesetzt wird.
2. Für jede Oberfläche kann die individuelle maximale Ausdehnung in  $x,y$  und  $z$  berechnet werden und anstelle von  $l_{max}$  als Grundlage für einen Algorithmus dienen, nach dem die Nähe zu einem Grundelement bestimmt wird (Bounding-Box [78]).
3. Je größer  $\theta_{max} + \alpha$  ist, umso größer ist der Bereich um ein Grundelement, innerhalb dessen Oberflächen beim Testen auf Sichtbarkeit zu berücksichtigen sind. Es ist daher sinnvoll, auf der Grundlage der Bounding-Boxes für jede Fläche ein Intervall in  $\theta$  und ein Intervall in  $\phi$  zu berechnen und eine Verdeckungsprüfung für die betreffende Oberfläche nur dann durchzuführen, wenn die zu testende Blickrichtung innerhalb dieser Intervalle liegt<sup>1</sup>. Dieses Konzept wird das Testen eines Grundelements auf Sichtbarkeit gegenüber der derzeitigen Implementierung erheblich beschleunigen. In vielen Fällen wird entweder bereits

1.  $\theta_{gr}$  als Untergrenze für ein Intervall in  $\theta$  ist ein erster Schritt in diese Richtung.

die erste Verdeckungsprüfung für eine bestimmte Blickrichtung ein negatives Ergebnis liefern oder aber es ergibt sich ein positives Ergebnis, ohne daß eine Verdeckungsprüfung durchzuführen ist, wenn in der betreffenden Richtung überhaupt keine Oberflächen liegen.

### Verdeckungsprüfung

Die Prüfung, ob eine Oberfläche einen gegebenen Objektpunkt P verdeckt, wurde durch eine Methode des Oberflächenobjekts realisiert. Es ist insbesondere darauf hinzuweisen, daß dies die einzige Methode ist, die Oberflächenklassen den Grundelementen für die Verdeckungsprüfung zur Verfügung stellen müssen, da Kanten zu diesem Zweck durch eine Folge diskreter Punkte repräsentiert werden. Im Hinblick auf die Übersichtlichkeit der Softwarestruktur ist eine Beibehaltung dieses Konzepts wünschenswert. Wie in Kapitel 3.6 erläutert wurde, ist ein Objektpunkt dann sichtbar, wenn ein Kegel um die gegebene Blickrichtung mit Öffnungswinkel  $\alpha$  frei einsehbar ist. In diesem Abschnitt wird die Methode der Klasse "Vieleck" beschrieben.

Zunächst muß gewährleistet sein, daß die Richtungsvektoren aller Kanten einen Umlaufsinn der Berandung definiert (von außen gesehen im Uhrzeigersinn; s. Abb. 34).

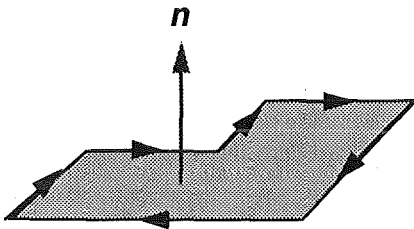


Abb. 34

Zur Durchführung einer Verdeckungsprüfung müssen die Richtungsvektoren der Kanten einer Oberfläche einen Umlaufsinn für die Berandung definieren ( $n$ : Normalenvektor der Oberfläche).

Im ersten Teil der Verdeckungsprüfung wird eine Gerade durch den Objektpunkt P in Blickrichtung (Sichtlinie) mit der Ebene, in der die betrachtete Oberfläche liegt, geschnitten. Für die Darstellung einer Ebene im Raum gilt:

$$d + nx = 0 \quad (5.4)$$

$n$ : Normalenvektor

$d$ : Abstand der Ebene zum Koordinatenursprung

Die Parameterdarstellung einer Geraden im Raum lautet:

$$p + tb = x \quad (5.5)$$

$b$ : Blickrichtungsvektor

$p$ : Koordinaten des Objektpunktes P

Damit ergibt sich für den Parameter  $t$  am Schnittpunkt von Gerade und Ebene der Wert:

$$t_0 = -\frac{d + np}{nb} \quad (5.6)$$

Falls  $nb = 0$  (Sichtlinie und Ebene parallel) oder  $t_0 \leq 0$  (Ebene schneidet die Sichtlinie unterhalb des Objektpunktes), wird die Verdeckungsprüfung abgebrochen. In diesen Fällen ist es zwar noch möglich, daß die betrachtete Oberfläche den Kegel um die Blickrichtung, für den Verdeckungsfreiheit gefordert wird, schneidet. Abb. 35 zeigt diese beiden Möglichkeiten. Da aber die Oberfläche Teil eines nach allen Seiten von Oberflächen begrenzten Körpers ist, wird die Verdeckung bei der Prüfung einer der anderen Oberflächen festgestellt<sup>1</sup>.

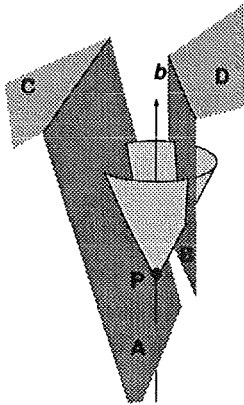


Abb. 35  
Oberflächen, die die Sichtlinie nicht oberhalb des Objektpunktes  $P$  schneiden ( $A$  und  $B$ ), können trotzdem innerhalb eines Kegels um die Sichtlinie liegen. Die Verdeckung wird dann bei benachbarten Oberflächen ( $C$  und  $D$ ) festgestellt.

Der Schnittpunkt  $x_0$  von Sichtlinie und Ebene ergibt sich durch Einsetzen von  $t_0$  in die Geradengleichung (5.5). Im nächsten Schritt wird für jede Kante der Abstand zum Punkt  $x_0$  bestimmt, sowie derjenige Kantenpunkt  $x_1$ , der  $x_0$  am nächsten liegt (Abb. 36).  $x_1$  ist entweder ein Punkt auf der Kante, der zwischen den beiden Eckpunkten liegt (der Abstand zur Kante ist durch das Lot von  $x_0$  zur Kante gegeben; grau unterlegter Bereich in Abb. 36), oder  $x_1$  ist einer der Eckpunkte, falls  $x_0$  außerhalb dieses Bereichs liegt.

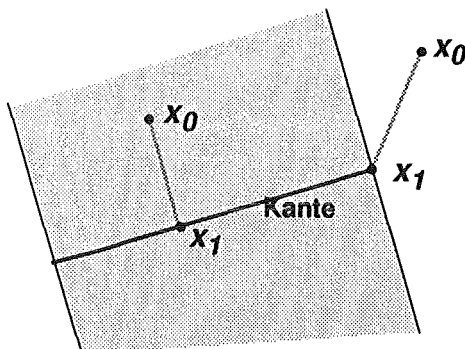


Abb. 36  
Der Abstand zwischen  $x_0$  (Schnittpunkt von Sichtlinie und Ebene der betrachteten Oberfläche) und einer Kante ist entweder durch das Lot von  $x_0$  zur Kante oder durch den Abstand zwischen  $x_0$  und einer der Ecken gegeben. ( $x_1$ : Punkt auf der Kante, der jeweils zu  $x_0$  am nächsten liegt)

Der Winkel zwischen  $b$  und  $x_1-p$  muß größer als der Öffnungswinkel  $\alpha$  des Kegels um die Sichtlinie sein (Abb. 37). Ist dies nicht der Fall, liegt eine Verdeckung vor. Weitere Berechnungen sind nicht notwendig.

1. Vom objektorientierten Standpunkt aus sollte keine Annahme darüber gemacht werden, in welchem Kontext die Methode Verdeckungsprüfung benutzt wird. Um die Methode auch in anderen Zusammenhängen benutzen zu können, muß in den beiden genannten Fällen eine evtl. vorliegende Verdeckung festgestellt werden.

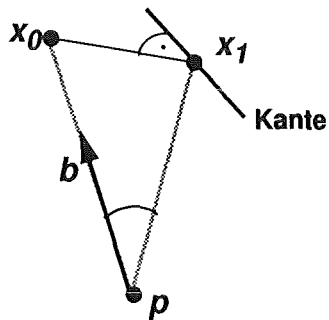


Abb. 37

Der Winkel zwischen der Blickrichtung  $b$  und der Strecke zwischen  $p$  (Objektpunkt) und dem Kantenpunkt  $x_1$  muß größer sein als der Öffnungswinkel  $\alpha$  des Kegels um die Blickrichtung, für den Verdeckungsfreiheit gefordert wird.

Falls bei keiner der Kanten eine Verdeckung des Kegels um die Sichtlinie vorliegt, muß im nächsten Schritt noch ermittelt werden, ob  $x_0$  innerhalb (Verdeckung) oder außerhalb (keine Verdeckung) der Berandung der Oberfläche liegt. Hierzu wird diejenige Kante ermittelt, für die  $|x_0 - x_1|$  minimal ist. Hier können drei Fälle auftreten:

1. Es gibt genau eine Kante.
2. Es gibt mehrere Kanten mit unterschiedlichem  $x_1$ . Im folgenden braucht nur eine dieser Kanten berücksichtigt zu werden.
3. Es gibt genau zwei aufeinanderfolgende Kanten und  $x_1$  ist der gemeinsame Eckpunkt. Dieser Fall ist in Abb. 38a dargestellt. Er tritt dann auf, wenn  $x_0$  im schraffierten Bereich liegt. Es wird dann eine neue Hilfskante  $h$  erzeugt. Sie verläuft durch den gemeinsamen Eckpunkt. Ihr Richtungsvektor ist durch die Summe der Richtungsvektoren der beiden Kanten gegeben (Abb. 38b).

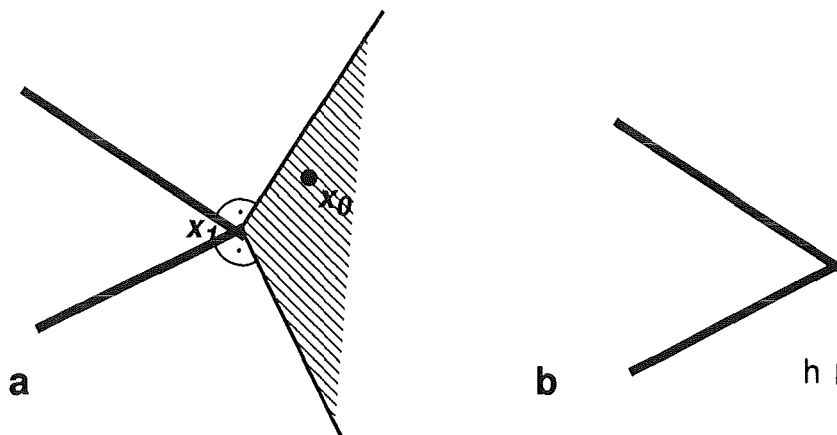


Abb. 38

Für den Fall, daß  $x_0$  im schraffierten Bereich in der Nähe zweier Kanten mit der gemeinsamen Ecke  $x_1$  liegt (a), wird eine Hilfskante  $h$  erzeugt (b).

Nun ist für jeden der drei Fälle eine Kante ausgewählt, die zu  $x_0$  am nächsten liegt. Die Gerade, durch die diese Kante beschrieben wird, teilt die Ebene, in der die betrachtete Oberfläche liegt, in zwei Halbebenen, wobei durch den Richtungsvektor der Kante festgelegt ist, auf welcher Seite das Innere und auf welcher Seite das Äußere der Oberfläche liegt (Abb. 39). Dies ist auch für



die Hilfskante  $h$  der Fall. Der Bereich, in dem  $x_0$  liegt, befindet sich vollständig auf einer Seite von  $h$ .

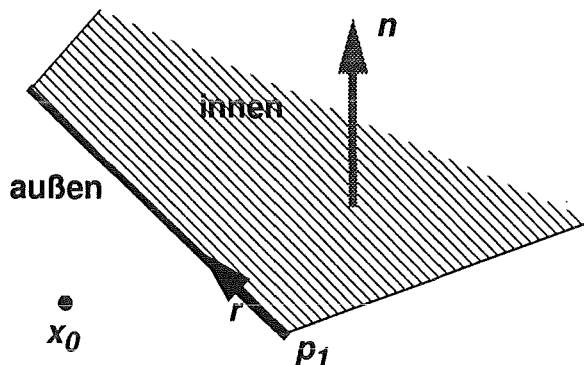


Abb. 39  
Durch den Richtungsvektor  $r$  einer Kante ist festgelegt, auf welcher Seite der Kante das Innere und auf welcher Seite das Äußere der von der Kante berandeten Oberfläche liegt.  $x_0$  liegt in diesem Fall außerhalb der Oberfläche.

$x_0$  liegt für

$$(r \times (x_0 - p_1)) \cdot n > 0 \quad (5.7)$$

$r$ : Richtungsvektor der Kante  
 $p_1$ : erste Ecke der Kante  
 $n$ : Normalenvektor der Oberfläche

außerhalb, sonst innerhalb der Oberfläche.

Mit dieser Methode läßt sich Verdeckungsfreiheit für einen Kegel um eine gegebene Blickrichtung für beliebige Vielecke als Oberflächen von dreidimensionalen Körpern feststellen. Entsprechende Algorithmen werden bei Erweiterung um neue Geometrieformen für jeden neuen Oberflächentyp benötigt.

### Aufsetzpunkt

Die Berechnung eines optimalen Aufsetzpunktes ist eine grundlegende, für alle Auftragstypen durchzuführende Aufgabe. Sie wurde daher als Methode der Klasse "Meßauftrag" implementiert. Jede neue, von „Meßauftrag“ abgeleitete Auftragsklasse kann diese Methode benutzen, so daß bei ihrer Implementierung keine zusätzliche, typabhängige Programmierung erforderlich wird. Die Wahl eines Aufsetzpunktes findet statt, nachdem eine Blickrichtung ermittelt wurde, für die Verdeckungsfreiheit vorliegt, d.h. die vorläufigen auftragsabhängigen REM-Parameter  $\phi$ ,  $\theta_l$  und  $\theta_r$  sind bekannt. Aus der Operationsfolge des Meßauftrags sind die Grundelemente bekannt, die im linken bzw. rechten Bild erkannt werden müssen. Der Aufsetzpunkt  $a$  muß so gewählt werden, daß die Grundelemente in beiden Bildern innerhalb des Bildausschnitts liegen und daß eine möglichst hohe Vergrößerung gewählt werden kann. Die Berechnungen werden in Parallelprojektion durchgeführt.

Für die nachfolgenden Ausführungen werden folgende Festlegungen getroffen:

- Die Rotation  $R$  erfolgt um die  $z$ -Achse entgegen dem Uhrzeigersinn bei Sicht in Richtung negative  $z$ -Achse.

- Eine Kippung  $K$  erfolgt um die  $y$ -Achse entgegen dem Uhrzeigersinn bei Sicht in Richtung positive  $y$ -Achse.
- $x = (x, y, z)$  ist ein Objektpunkt in Substratkoordinaten.
- $x' = (x', y', z') = Rx$  ist ein Objektpunkt nach der Rotation in Substratkoordinaten.
- $x'' = (x'', y'', z'') = Kx' = KRx$  ist ein Objektpunkt nach zusätzlicher Kippung in Substratkoordinaten.
- $a' = Ra$  ist der Aufsetzpunkt nach der Rotation in Substratkoordinaten.
- Es wird von einem quadratischen Bildausschnitt ausgegangen.

### 1. Schritt:

Alle Grundelemente werden um den Winkel  $\phi$  rotiert:  $x' = Rx$  (Abb. 40).

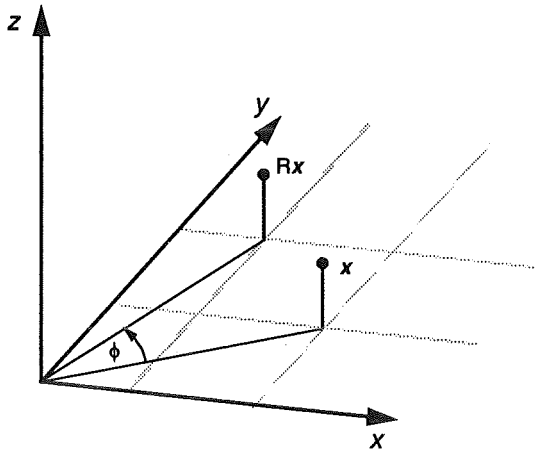


Abb. 40  
Darstellung der Rotation eines Objektpunktes  $x$  um die  $z$ -Achse. Für den Aufsetzpunkt  $a$  gilt:  
 $a_z = 0 \rightarrow a'_z = 0$ .

### 2. Schritt:

Da die Kippung um die  $y$ -Achse erfolgt und die Berechnungen in Parallelprojektion durchgeführt werden, ändert sich die  $y$ -Koordinate der Objektpunkte nicht mehr ( $y'' = y'$ ) (vgl. Abb. 41).

Jetzt können alle (rotierten) Grundelemente auf die  $x,y$ -Ebene projiziert werden und der minimale  $y$ -Wert ( $\eta_{min}$ ) sowie der maximale  $y$ -Wert ( $\eta_{max}$ ) aller projizierten Objektpunkte der Grundelemente kann bestimmt werden.

Damit kann nun  $a'_y$  bestimmt werden.  $a'_y$  soll in der Mitte zwischen  $\eta_{min}$  und  $\eta_{max}$  liegen:

$$a'_y = \frac{\eta_{min} + \eta_{max}}{2} \quad (5.8)$$

### 3. Schritt:

Alle Grundelemente werden um die  $y$ -Achse um den Winkel  $\theta_l$  rotiert (gekippert) (Abb. 41):  
 $x'' = Kx' = KRx$ .

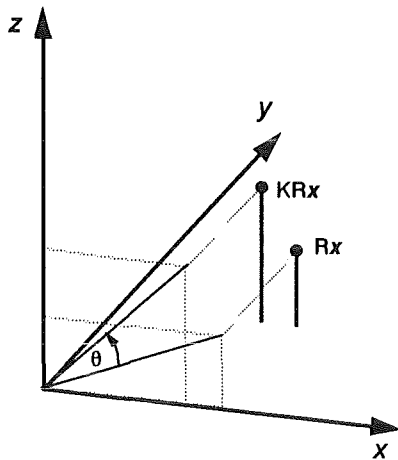


Abb. 41  
Darstellung der Kippung eines Objektpunktes  
 $x' = Rx$  um die  $y$ -Achse.

#### 4. Schritt:

Alle rotierten und um  $\theta_l$  verkippten Grundelemente werden auf die  $x,y$ -Ebene projiziert und der minimale  $x$ -Wert ( $\xi_{min}^l$ ) sowie der maximale  $x$ -Wert ( $\xi_{max}^l$ ) für das linke Bild werden bestimmt.

#### 5. Schritt:

Dieser Schritt ist analog zum 3. Schritt. Alle (rotierten) Grundelemente werden um den Winkel  $\theta_r$  gekippt.

#### 6. Schritt:

Analog zum 4. Schritt werden die Werte  $\xi_{min}^r$  und  $\xi_{max}^r$  für das rechte Bild bestimmt.

#### 7. Schritt:

Die Kippung des Probestisches erfolgt nicht um die  $y$ -Achse, sondern um eine zur  $y$ -Achse parallele Achse durch den Aufsetzpunkt  $a'$ , d.h.

$$K(Rx - a') + a' = KRx + a' - Ka' = KRx + v \quad (5.9)$$

Der erste Term  $KRx$  ist die im 3. Schritt bzw. im 5. Schritt durchgeführte Kippung;  $v = a' - Ka'$  ist ein Korrekturterm aufgrund der Verschiebung der Kippachse.

Der minimale  $x$ -Wert  $\xi_{min}$  bzw. der maximale  $x$ -Wert  $\xi_{max}$  für beide Bilder ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} \xi_{min} &= \min((\xi_{min}^l + v_x^l), (\xi_{min}^r + v_x^r)) \\ \xi_{max} &= \max((\xi_{max}^l + v_x^l), (\xi_{max}^r + v_x^r)) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Die in diesen Gleichungen enthaltene  $x$ -Komponente des Korrekturterms  $v$  aus (5.9) ist

$$v_x^i = a'_x (1 - \cos\theta_i) \quad i = l, r \quad (5.11)$$

und ist wegen

$$a'_x = \frac{\xi_{min} + \xi_{max}}{2} \quad (5.12)$$

von  $\xi_{min}$  und  $\xi_{max}$  abhängig. Aus den vier Kombinationsmöglichkeiten in (5.10) ist diejenige auszuwählen, für die  $\xi_{max} - \xi_{min}$  minimal wird. Damit kann die maximale Vergrößerung erreicht werden, falls die Vergrößerung durch die Ausdehnung der betrachteten Szene in  $x$ -Richtung begrenzt wird, also falls  $\xi_{max} - \xi_{min} > \eta_{max} - \eta_{min}$ .

Das Ergebnis des 7. Schrittes sind die Werte für  $\xi_{min}$ ,  $\xi_{max}$  und  $a'_x$ .

### 8. Schritt:

Die Vergrößerung  $M$  wird bestimmt durch das Maximum von  $\xi_{max} - \xi_{min}$  und  $\eta_{max} - \eta_{min}$ :

$$M = \frac{fB}{\delta} \quad (5.13)$$

B: Bildgröße

f: Bildausnutzungsfaktor

$\delta = \max((\xi_{max} - \xi_{min}), (\eta_{max} - \eta_{min}))$ .

Falls  $\delta = 0$  wird die Vergrößerung auf einen für diesen Fall festgelegten Maximalwert gesetzt.  $\delta = 0$  tritt z.B. dann auf, wenn lediglich eine Ecke im linken Bild erkannt werden soll, also bei dem Meßauftrag Verifikation mit dem Bezugsobjekt Ecke.

### 9. Schritt:

$a'$  ist der rotierte Aufsetzpunkt. Der tatsächliche Aufsetzpunkt  $a$  ergibt sich durch die Rücktransformation  $a = R^{-1}a'$ .

$a$  und  $M$  sind die Resultate des Algorithmus und vervollständigen den Satz auftragsabhängiger REM-Parameter. Die Grundelemente, also Ecken und Kanten, benötigen Methoden zur Rotation um jede der drei Koordinatenachsen in beliebiger Richtung sowie Methoden zur Bestimmung ihrer maximalen bzw. minimalen  $x$ - bzw.  $y$ -Koordinaten.

### Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit

Generell ist davon auszugehen, daß ein Meßauftrag mit der größtmöglichen Genauigkeit durchgeführt werden soll. Daneben gibt es auch die Möglichkeit, eine bestimmte Sollgenauigkeit zu fordern. Es ist bei stereophotogrammetrischen Vermessungen nicht möglich, allgemeine Aussagen über erreichbare Meßgenauigkeiten, wie z.B. „Die Distanz zwischen Ecken kann mit einer Genauigkeit von  $x\%$  gemessen werden“, zu machen. Obwohl in dieser Aussage sowohl

Auftragstyp als auch die Typen der Bezugsobjekte spezifiziert sind, hängt die erreichbare Genauigkeit von der Geometrie der Strukturen in der Nachbarschaft der angegebenen Ecken ab. Wegen der geforderten Sichtbarkeit der Ecken in beiden Bildern gibt es jeweils nur eine begrenzte Zahl von möglichen Blickrichtungen, die von Fall zu Fall unterschiedlich sind. Ferner hängt die Genauigkeit von verschiedenen Einflußgrößen ab, die in die von der jeweiligen Operationsfolge vorgegebenen Berechnungen eingehen. Daher wird bei der Vorbereitung für einen ermittelten Satz auftragsabhängiger REM-Parameter (d.h. für eine freie Blickrichtung) die erreichbare Genauigkeit berechnet. Der Vergleich mit der Sollgenauigkeit entscheidet darüber, ob die Blickrichtung akzeptiert wird oder ob mit der Suche nach einer neuen, freien Blickrichtung fortzufahren ist.

Für eine gegebene Blickrichtung sind die theoretischen Werte aller Zwischengrößen eines Meßauftrags bis hin zur Meßgröße bekannt. Die Genauigkeit hängt von diesen Werten ab. Ferner ist sie abhängig von den Werten der auftragsabhängigen REM-Parameter und der Genauigkeit, mit der diese eingestellt werden bzw. bekannt sind. Anstelle des Parameters REM-Vergrößerung geht in die Berechnungen die Pixelauflösung (in Pixel/Längeneinheit) ein, die aus der REM-Vergrößerung und der Pixelanzahl im digitalisierten Bild bestimmt wird.

Die in der vorliegenden Programmversion implementierten Genauigkeitsrechnungen haben das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz zur Grundlage [79]. Danach gilt für den Fehler  $\Delta F$  eines aus fehlerbehafteten Größen errechneten Funktionswertes  $F(x, y, \dots)$ :

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \dots} \quad (5.14)$$

$\Delta x, \Delta y, \dots$ : Fehler der einzelnen Größen

Es werden die Fehler der in die Projektionsrechnungen (2.1) eingehenden Größen  $\theta, M, D, X_l, X_r$  und  $Y_l$  berücksichtigt.  $X_l, X_r$  und  $Y_l$  sind die Pixelkoordinaten von Ecken; ihr Fehler gibt an, mit welcher Genauigkeit eine Eckenposition im Bild bestimmt werden kann und hängt von dem Verfahren zur Mustererkennung ab.  $M$  ist dann die Pixelauflösung. Bisher wurden nur Messungen durchgeführt, bei denen die Parallelprojektionsnäherung gültig ist. Falls dies nicht der Fall ist, muß in den Genauigkeitsrechnungen auch die Stabilität der Kippachse berücksichtigt werden.

## 5.4 Anwendungsbeispiele

Als Beispiele für die Arbeitsweise der Vorbereitung werden einige Aufträge an vier verschiedenen Teststrukturen vorgegeben. Die Strukturen sind in Abb. 42 dargestellt; die Meßaufträge wurden als weiße Pfeile eingezeichnet.

Das Bild links oben zeigt einen Würfel mit der Kantenlänge  $100 \mu\text{m}$ , einen Quader mit geringerer Strukturhöhe und eine schiefe Pyramide mit einer Höhe von  $150 \mu\text{m}$ . Als Auftrag 1 ist die Raumdiagonale des Würfels zu bestimmen. Der Auftrag wird als Vermessungssimulation an synthetischen Bildern durchgeführt.

Rechts oben ist eine Struktur mit L-förmigem Grundriß abgebildet, an der ein weiterer Distanzauftrag 2 durchzuführen ist.

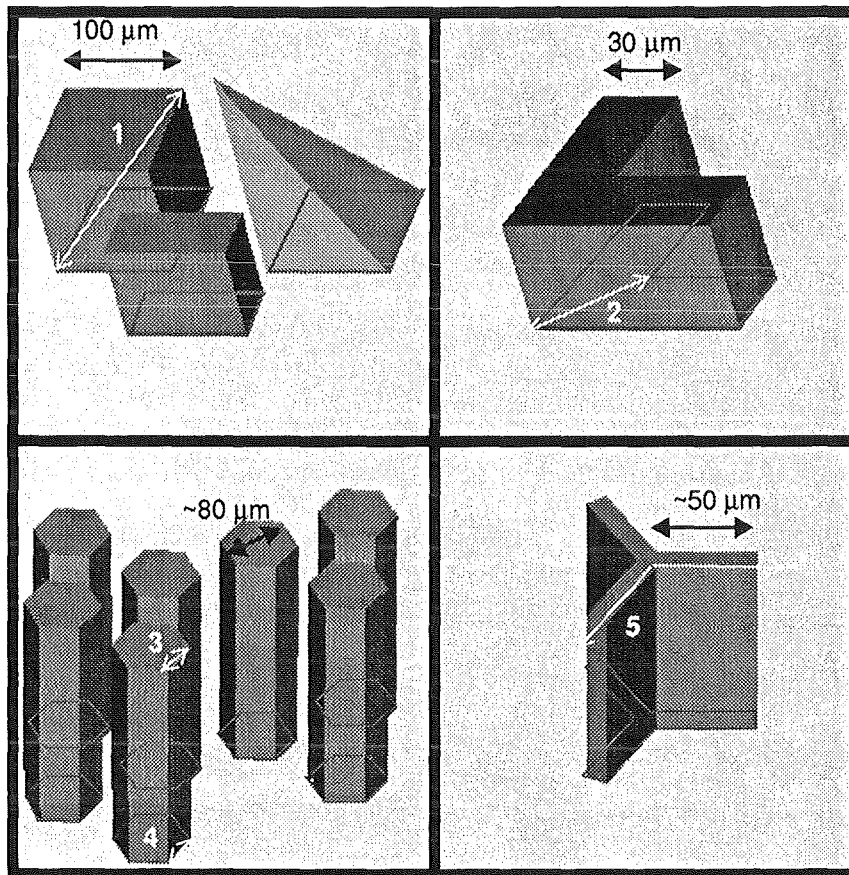


Abb. 42

Beispielaufträge an vier verschiedenen Teststrukturen (weiße Pfeile):

Die Strukturen in den beiden oberen Bildern sind reine Teststrukturen, während die Strukturen in den unteren Bildern als reale LIGA-Strukturen zur Verfügung standen. Die beiden Distanzaufträge an den Strukturen links (3, 4) und der Auftrag zur Winkelmessung an der rechten Struktur (5) wurden anhand von REM-Aufnahmen durchgeführt, die nach den von der Vorbereitung gelieferten Parametern aufgenommen wurden. Zur Veranschaulichung wurden jeweils die Grundrisse der Strukturen eingezeichnet.

Im unteren linken Bild sind sieben Säulen mit hexagonalem Querschnitt abgebildet. Diese Strukturen existieren auch als reale LIGA-Strukturen. Die Geometriedaten für die Vorbereitung wurden durch zweidimensionale Vermessung im Lichtmikroskop bestimmt. Zur Vereinfachung der Dateneingabe wurden die gemessenen Werte aufgerundet. Die Schlüsselweite beträgt 80 µm. Aufgrund einer Messung durch Fokussieren im Lichtmikroskop (auf die Struktur- bzw. auf die Substratoberfläche) wurde für die Strukturhöhe ein Wert von 300 µm angenommen. Als erster Praxistest für eine stereophotogrammetrische Vermessung am Rasterelektronenmikroskop wurden die beiden eingezeichneten Aufträge zur Messung der Kantenlänge (3 und 4) gestellt. Diese Aufträge wurden ausgewählt, da hier mehrere Möglichkeiten bestehen, diese Messungen auch auf andere Art durchzuführen und so Vergleichsmöglichkeiten zu haben. Ferner ist bekannt, daß die Strukturen eine leichte Konizität aufweisen, die mit diesen beiden Aufträgen nachgewiesen werden soll.

Die Struktur im unteren rechten Bild ist Teil eines Filters für elektromagnetische Wellen im ferneren Infrarotbereich (Negativstruktur). Auch hier wurden die Daten für das Geometriemodell wieder durch Messung im Lichtmikroskop bestimmt. Als Beispiel wird hier ein Auftrag zur Winkelmessung (5) gestellt; auch hier ist wieder eine zweidimensionale Kontrollmessung möglich.

Im folgenden wird sowohl die Vorbereitung als auch die Durchführung (Simulation bzw. tatsächliche Vermessung) der fünf Meßaufträge diskutiert.

### Auftrag 1:

Der Auftrag wurde vorbereitet für ein Bild mit 256 Pixel pro Bildzeile. Die Bildfläche wird bis auf einen Randstreifen von 26 Pixeln Breite (d.h. 10% der Bildgröße) ausgenutzt. Der maximal einstellbare Kippwinkel ist  $60^\circ$ . Für den Stereokippwinkel werden  $10^\circ$  vorgegeben. Der Öffnungswinkel für den frei einsehbaren Kegel um die Sichtlinie beträgt  $10^\circ$ . Es stehen 545 Blickrichtungen zur Auswahl ( $\theta_S=3^\circ$ ).

Als einziger Ungenauigkeitsfaktor wird für die Eckenerkennung eine Pixelgenauigkeit von  $\pm 1$  Pixel angenommen. Im übrigen werden die synthetischen Bilder für die Vermessungssimulation ohne nennenswerte Ungenauigkeiten für Kippwinkel, Vergrößerung und Arbeitsabstand erzeugt.

Für den vorzubereitenden Auftrag wird maximale Genauigkeit gefordert.

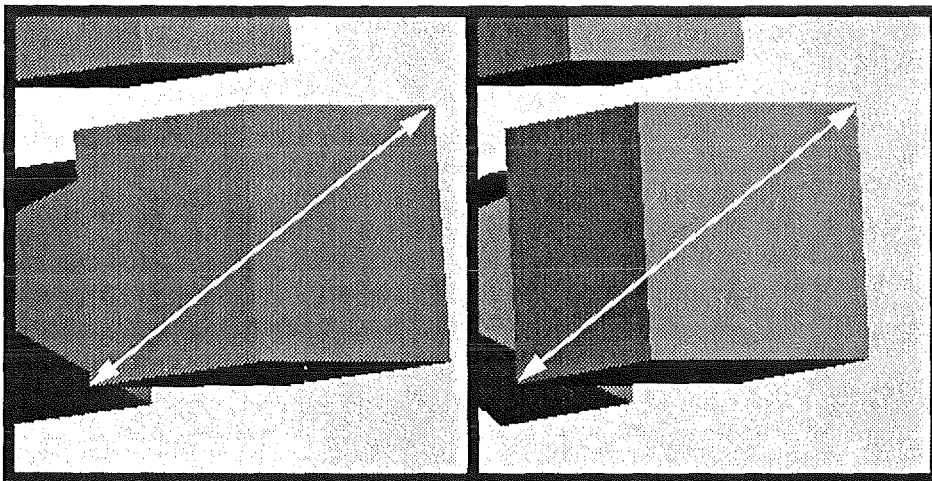


Abb. 43

Visualisierung des Ergebnisses der Vorbereitung für Auftrag 1:  
Im linken Bild sind die Strukturen um  $48^\circ$  verkippt, im rechten um  $58^\circ$ . Die zu vermessende Distanzlinie ist in den Bildern eingezeichnet.

Die Ergebnisse der Vorbereitung sind in Abb. 43 visualisiert. Diese Bilder sind auch Ausgangspunkt für die simulierte Vermessung. Die Pixelauflösung im Bild beträgt  $1.39 \text{ Pixel}/\mu\text{m}$ . Die erreichbare Genauigkeit bei der simulierten Vermessung ist  $\pm 1.03 \mu\text{m}$ . Für die Interpretation des Ergebnisses sind zwei Punkte besonders interessant. Zum einen wurde die zur Verfügung ste-

hende Bildfläche optimal ausgenutzt. Im linken Bild wurde die eine Ecke am rechten (inneren) Bildrand plaziert, im rechten Bild die andere Ecke am linken Rand. Ferner wurden die Kippwinkel so gewählt, daß die Distanzlinie im Raum möglichst parallel zur Bildebene liegt. Die Ursache dafür ist, daß die 3D-Berechnungen senkrecht zur Bildebene die größten Ungenauigkeiten aufweisen. Werden andere Ungenauigkeitsfaktoren (z.B. Kippwinkelungenauigkeit) berücksichtigt, kann dieses Kriterium davon überdeckt werden.

Für die Vermessung der synthetisch erzeugten Bilder wurden mit einer Routine des KHOROS-Systems [77] Kantenbilder erzeugt und die Positionen der Ecken in diesen Bildern interaktiv bestimmt (Abb. 44). Bei dieser Vorgehensweise ergibt sich als Erfahrungswert eine Pixelungenauigkeit von ca.  $\pm 1$  Pixel. Die (X,Y)-Positionen der Ecken werden einem Vermessungsprogramm (Methode zur Vermessungssimulation der Meßauftragsklasse "Distanz") übergeben.

Das Meßergebnis beträgt bei diesem Beispiel 173.93  $\mu\text{m}$  bei einer Solldistanz von 173.21  $\mu\text{m}$ .

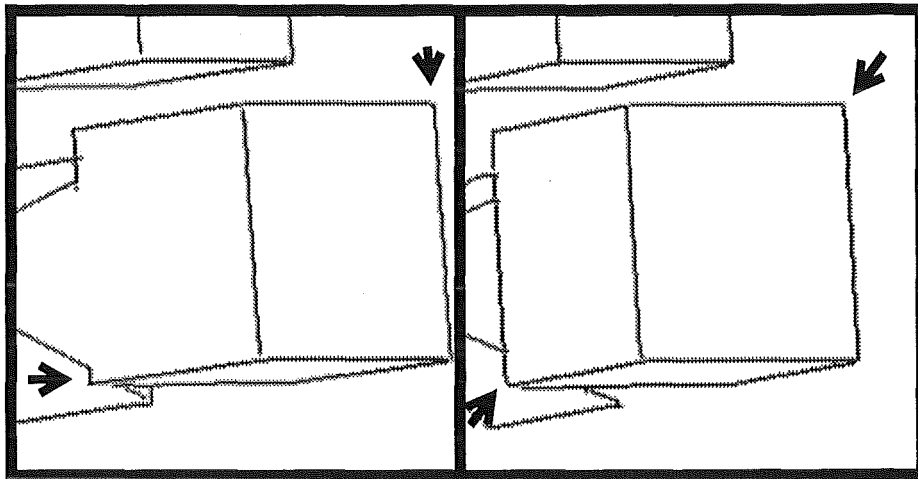


Abb. 44

Vermessungssimulation (Auftrag 1):

Die Pixelkoordinaten der Ecken (Pfeile) werden in einem Kantenbild bestimmt und einem Vermessungsprogramm übergeben.

### Auftrag 2:

Wie man sich leicht anhand Abb. 42 überzeugen kann, ist der Meßauftrag nicht durchführbar, da es keine Blickrichtung gibt, aus der beide Ecken gleichzeitig sichtbar sind. Diese Undurchführbarkeit wird von der Vorbereitung erkannt. Der Auftrag wird entsprechend gekennzeichnet und das Programm fährt mit der Vorbereitung für den nächsten Auftrag fort. In diesem Fall hätte ein Benutzer bei der Auftragserstellung sicher auch ohne viel Erfahrung die Undurchführbarkeit erkannt und den Auftrag gar nicht erst angegeben. Bei komplexeren Strukturgeometrien sind Entscheidungen über die Durchführbarkeit jedoch selbst bei einem einfachen Meßauftrag wie einer Distanzmessung nicht mehr ohne weiteres zu treffen.



Alle nun folgenden Aufträge wurden an einem Rasterelektronenmikroskop JEOL JSM-6600 durchgeführt. Dazu sind folgende Anmerkungen zu machen:

- Für eine hochgenaue Steuerung des Probenstisches, die notwendig ist, um die Proben um den vorausberechneten Aufsetzpunkt zu rotieren und zu verkippen, muß die Steuerungssoftware für den Tisch kalibriert werden. Dies kann erst im Rahmen der Entwicklungsarbeiten zur Systemkomponente REM-Steuerung geschehen. Aus diesem Grund wurde in den Stereobildern jeweils eine Ecke als Referenzpunkt gewählt, was eine Verschiebung der Kippachse bedeutet. Messungen sind so nur dann möglich, wenn die Parallelprojektionsnäherung gültig ist. Bei den vorliegenden Meßaufträgen war dies wegen hoher Vergrößerungen und hohen Arbeitsabständen der Fall.
- Die Ungenauigkeiten für REM-Parameter wie Kippwinkel, Vergrößerung und Arbeitsabstand sind nicht bekannt. Der Vorbereitung wurden daher angenommene Werte übergeben. Damit war es möglich, die Meßaufträge für die Durchführung mit maximaler Genauigkeit vorzubereiten, obwohl der Absolutwert der Meßgenauigkeit nicht bekannt ist.
- Sämtliche gemessenen Distanzwerte lagen gegenüber den am Lichtmikroskop gemessenen Werten zu hoch. Als Ursache wurde ein systematischer Fehler festgestellt, der auf eine Fehlkalibrierung des Bildspeichersystems des Mikroskops zurückzuführen ist. Die von diesem System in die Bilder eingeblendeten Vergrößerungsbalken wurden für die Berechnung der tatsächlichen Pixelauflösung verwendet. Sie sind um ca. 10% zu kurz, woraus ein entsprechender Fehler bei den Meßergebnissen resultiert. Im folgenden werden außer den tatsächlich gemessenen Ergebnissen auch die um 10% gekürzten Werte in Klammern angegeben.
- Die Vorbereitung wurde für Bilder mit 1024 Pixeln pro Bildzeile durchgeführt. Die übrigen Systemparameter sind die gleichen wie bei Auftrag 1.

#### Aufträge 3 und 4:

Abb. 45 und Abb. 46 zeigen jeweils oben die Visualisierung der Vorbereitungsergebnisse und unten die nach diesen Ergebnissen aufgenommenen REM-Bilder für die Aufträge 3 und 4. Bei Auftrag 4 wurde die zu messende Distanzlinie in die Kippachse gelegt. Dies war möglich, da es sich um eine Distanzlinie auf der Substratoberfläche handelt und für diese Blickrichtung keine Verdeckung vorlag. Bei einer Vermessung in dieser Einstellung ist der Einfluß der Kippwinkelungenauigkeit maximal reduziert.

Die Messungen anhand der REM-Aufnahmen wurden mit Hilfe des KHOROS-Bildverarbeitungssystems [77] durchgeführt.

Für Auftrag 3 wurde eine Distanz von 48.4  $\mu\text{m}$  (43.6  $\mu\text{m}$ ) gemessen. Der Mittelwert der Messungen im Lichtmikroskop betrug 44.3  $\mu\text{m}$ . Das Ergebnis für Auftrag 4 beträgt 50.2  $\mu\text{m}$  (45.2  $\mu\text{m}$ ). Bei beiden Aufträgen konnte auch eine Messung am Einzelbild vorgenommen werden, da die Distanzlinien parallel zur Bildebene liegen. Für Auftrag 3 wurden 48.3  $\mu\text{m}$  (43.5  $\mu\text{m}$ ) und für Auftrag 4 50.0  $\mu\text{m}$  (45.0  $\mu\text{m}$ ) gemessen. Die Ergebnisse zeigen auch die leichte Konizität der Säulen.

In einem weiteren Auftrag wurde die Strukturhöhe bestimmt. Das Ergebnis ist 338  $\mu\text{m}$  (304  $\mu\text{m}$ ). Im Vergleich dazu wurde durch Fokussierung im Lichtmikroskop eine Strukturhöhe von 303  $\mu\text{m}$  gemessen.

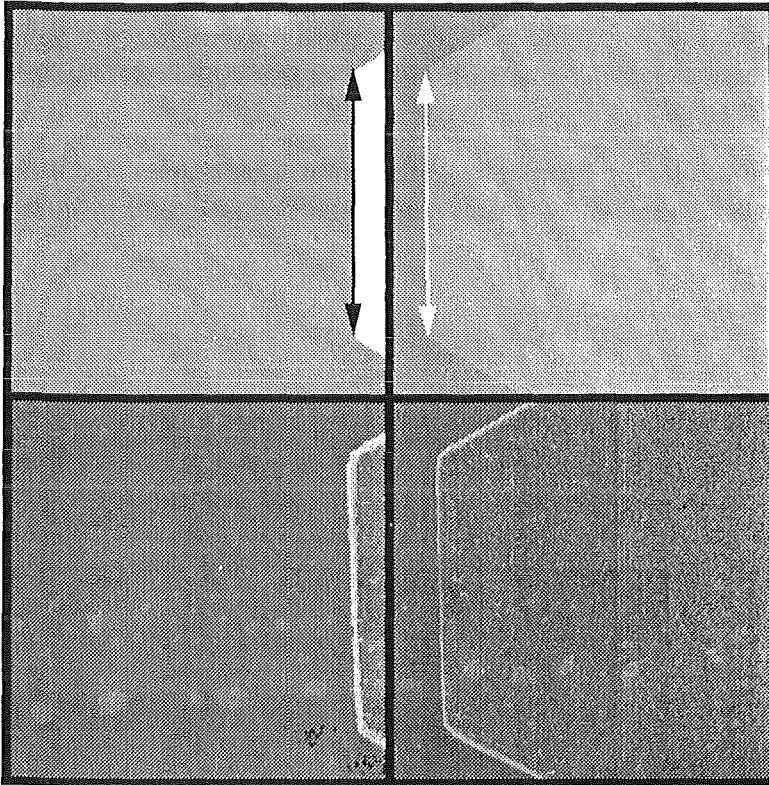


Abb. 45  
 Visualisierung der Ergebnisse der  
 Vorbereitung für Auftrag 3 (oben):  
 Die Kippwinkel sind  $9^\circ$  und  $19^\circ$ .  
 Unten sind die REM-Aufnahmen  
 abgebildet, an denen die Vermes-  
 sungen durchgeführt wurden.

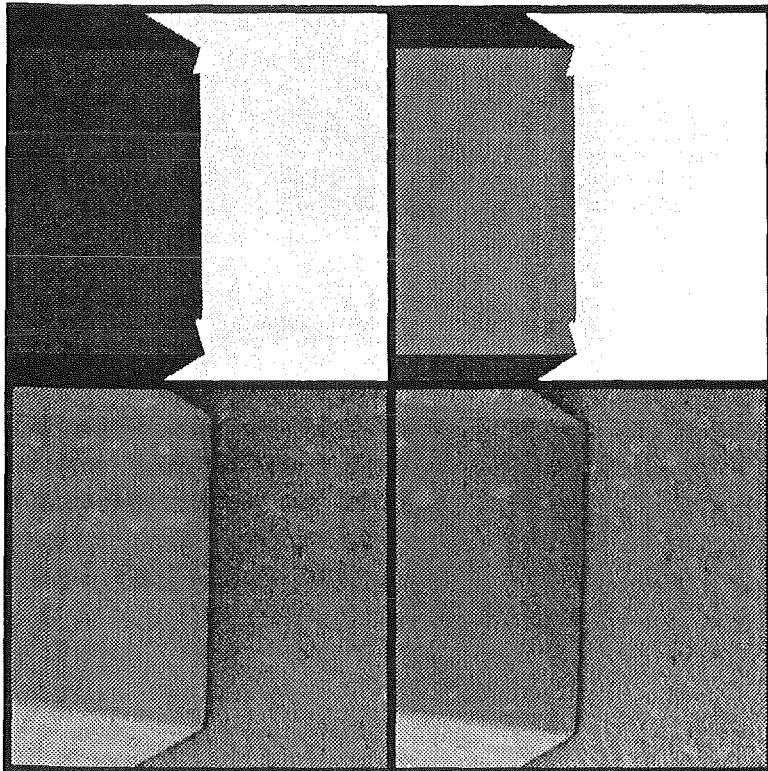


Abb. 46  
 Visualisierung der Ergebnisse der  
 Vorbereitung für Auftrag 4 (oben):  
 Die Kippwinkel sind  $18^\circ$  und  $28^\circ$ .  
 Unten sind die REM-Aufnahmen  
 abgebildet, an denen die Vermes-  
 sungen durchgeführt wurden.

**Auftrag 5:**

In Abb. 47 sind die Vorbereitungsergebnisse und die REM-Aufnahmen für Auftrag 5 dargestellt. Der Sollwert für den zu messenden Winkel ist aufgrund der dreistrahligen Symmetrie der Struktur  $120^\circ$ . Gemessen wurden  $119^\circ$ .

Im selben Bildpaar wurde zur Kontrolle die Strukturhöhe bestimmt. Das Ergebnis ist  $107\ \mu\text{m}$  ( $96.3\ \mu\text{m}$ ) gegenüber  $96.9\ \mu\text{m}$  als Ergebnis für die Messung durch Fokussierung im Lichtmikroskop.

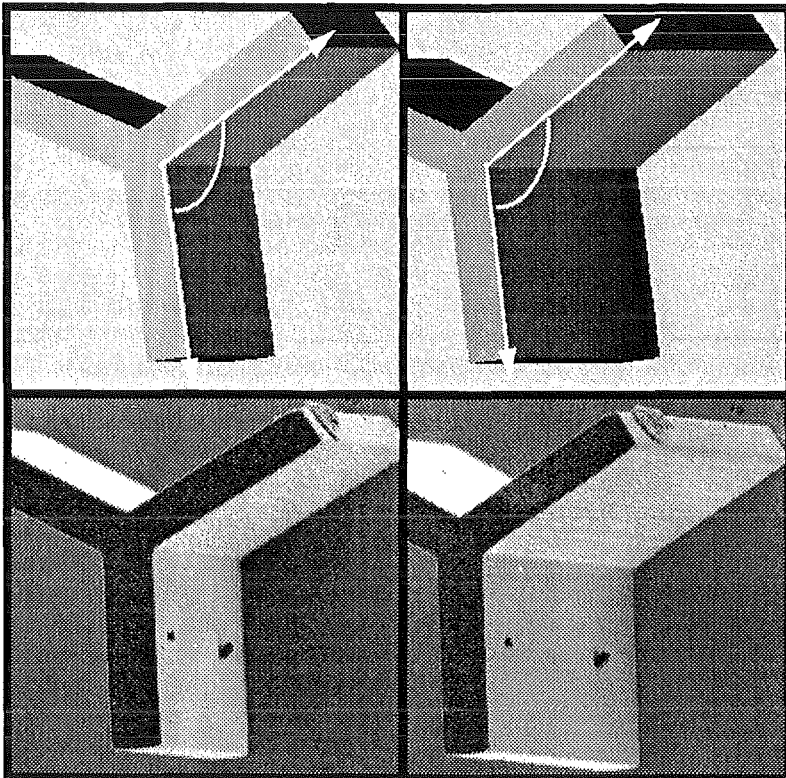


Abb. 47

Visualisierung der Ergebnisse der Vorbereitung für Auftrag 5 (oben): Die Kippwinkel sind  $12^\circ$  und  $22^\circ$ . Unten sind die REM-Aufnahmen abgebildet, an denen die Vermessungen durchgeführt wurden. In den oberen Bildern ist der zu messende Winkel eingezeichnet.

Die Meßaufträge der hier vorgestellten Beispiele wurden zu Beginn dieses Kapitels formuliert, ohne daß Vorwissen darüber vorausgesetzt wurde, wie diese Aufträge durchgeführt werden können. Die Systemkomponente Vorbereitung ist in der Lage, den Ablauf einer Vermessung zu planen und als Ergebnis die an Mikroskop und Probenstisch einzustellenden Parameter vorzugeben. Aufgrund dieser Parameter können entsprechende Stereo-REM-Bilder akquiriert werden. Anhand dieser Bilder sind photogrammetrische Vermessungen an dreidimensionalen Strukturen möglich.

## 6 Ergebnisse und Ausblick

Bei der Herstellung technisch hochwertiger Produkte sind umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen unerlässlich. Die Kontrolle auf Einhaltung von bestimmten Produktmerkmalen und das rechtzeitige Erkennen und Aussondern fehlerhafter Produkte sichern einen hohen Qualitätsstandard und vermeiden unnötige Arbeitsschritte. Ferner können die Ursachen von auftretenden Fehlern ermittelt und durch gezielte Maßnahmen bei der Prozeßführung eine Wiederholung dieser Fehler vermieden werden [80]. Die langjährige Erfahrung bei der Qualitätssicherung in der Mikroelektronik mit Inspektionssystemen, Funktionstests für die Endprodukte, aber auch Messungen von elektrischen und geometrischen Parametern (z.B. Linienbreiten), ist auch für die Mikrosystemtechnik richtungsweisend. Bei mikromechanischen Komponenten von Mikrosystemen sind es vor allem geometrische Parameter, bei denen die Einhaltung bestimmter Toleranzen die Funktionsfähigkeit gewährleistet. Insbesondere beim LIGA-Verfahren sind zweidimensionale Strukturvermessungssysteme wie COSMOS-2D auch für den Einsatz während des industriellen Produktionsprozesses - bei vorgegebenen Taktzeiten und der Forderung nach einem vollautomatischen Meßablauf - geeignet. Im Gegensatz zu Strukturen der Mikroelektronik wird die volle Funktionalität von mikromechanischen Strukturen jedoch auch durch die dritte Dimension bestimmt. Die Überprüfung von Qualitätsmerkmalen in drei Dimensionen ist, hauptsächlich wegen unzureichender Tiefenschärfe bisher eingesetzter Prüfmikroskope und der gegenseitigen Verdeckung von Strukturen, häufig nicht möglich. In vielen Fällen dienen mehr oder weniger aufwendige Messungen bestimmter mechanischer Parameter zur Bestimmung der eigentlich interessierenden geometrischen Parameter, wie z.B. die Messung der Resonanzfrequenz eines Kreuzfedergelenks zur Bestimmung der Federdicke [80]. Nach Erfolgen im 2D-Bereich ist der nächste Schritt bei der Entwicklung von Strukturvermessungssystemen die Einbeziehung der dritten Dimension. Angesichts der damit verbundenen Schwierigkeiten wird diese Entwicklung im Gegensatz zum 2D-Fall einen viel höheren Aufwand erfordern und schrittweise erfolgen. Dennoch soll dabei das letztendliche Ziel, nämlich ein vollautomatisches und rasch arbeitendes Qualitätssicherungssystem, nicht aus den Augen verloren werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden wesentliche Grundlagen für die dreidimensionale Vermessung von mikromechanischen Strukturen geschaffen. Dabei wurden weder bestimmte Strukturgeometrien noch bestimmte Vermessungsaufgaben vorausgesetzt. Gemäß den Zielsetzungen wurde zunächst ein Meßverfahren ausgewählt. Verschiedene bildgebende Mikroskopverfahren, Verfahren zur 3D-Vermessung aus dem makroskopischen Bereich und Methoden zur Aufzeichnung des Mikroprofils von Probenoberflächen wurden nach festgelegten Kriterien bewertet. Als Ergebnis wurde die Rasterelektronenmikroskopie (REM) als reines Bildaufnahmeverfahren ausgewählt. Die Hauptvorteile sind eine hohe Schärfentiefe und der für eine Erkennung von Objektkonturen ausreichende Bildkontrast. Informationen über die Lage von geometrischen Strukturmerkmalen können aus REM-Aufnahmen durch photogrammetrische Methoden gewonnen werden. Dabei werden für jeden Meßauftrag Stereobilder der zu vermessenden Strukturen aufgenommen.

Um die Geometrie von Mikrostrukturen für ein 3D-Vermessungssystem zu beschreiben, wurde ein Grundmodell eingeführt, das vom zentralen Begriff eines geometrischen Elements ausgeht und Ecken, Kanten, Oberflächen sowie Körper als komplette dreidimensionale Strukturen kennt. Es wurden Untertypen dieser Elemente realisiert, die eine Beschreibung polyedrischer Strukturen ermöglichen. Die Erweiterungsfähigkeit des Modells wurde exemplarisch durch die

Einführung von imaginären Geometrieelementen, geraden Kreiszyklindern, singulären Flächenpunkten und Punkten auf Kanten demonstriert. Ferner wurde ein ebenfalls erweiterungsfähiges Modell zur Beschreibung von Meßaufträgen erstellt.

Das Vermessungssystem ist in mehrere Komponenten unterteilt. Um eine große Zahl von unterschiedlichen Meßaufträgen bei beliebiger Geometrie der Mikrostrukturen durchführen zu können, ist eine automatische Planung des Meßablaufs unbedingt erforderlich. Die Systemkomponente Vorbereitung, die diese Aufgabe zu erfüllen hat, ist von zentraler Bedeutung für das Gesamtkonzept. Hier werden für jeden Meßauftrag in Abhängigkeit von der jeweiligen Strukturgeometrie Parameter zur Steuerung von Mikroskop und Probenstisch berechnet. Aufsetzpunkt, Blickrichtung und Vergrößerung werden so gewählt, daß alle zu erkennenden geometrischen Merkmale der zu vermessenden Strukturen in beiden Bildern eines Stereopaars sichtbar sind. Ferner ist gewährleistet, daß Meßaufträge entweder mit maximal erreichbarer Genauigkeit oder mit einer - etwa durch eine geforderte Toleranz - vorgegebenen Sollgenauigkeit durchgeführt werden können. Die Vermessung realer Strukturen im Rasterelektronenmikroskop erfolgt für alle Meßaufträge nach einem festen, von der Vorbereitung vorgegebenen Schema. Nach der Bildakquisition werden in den Aufnahmen geometrische Merkmale der Strukturen erkannt und in einer auftrags- und geometrieabhängigen Operationsfolge die Meßgrößen berechnet. Zur Durchführung von Steuerungsaufgaben an Mikroskop und Probenstisch ist eine Systemkomponente REM-Steuerung vorgesehen. Durch Austausch dieser Komponente kann das Vermessungssystem an unterschiedliche Geräte angepaßt werden. Eine weitere Komponente des Systems ist für die Auswertung der Meßergebnisse zuständig. Hier können die Meßergebnisse interpretiert sowie Fehler und Fehlerursachen analysiert werden, mit dem Ziel, zukünftig Fehler zu vermeiden. Die Ausarbeitung einer detaillierten Konzeption für die Auswertung muß in Abstimmung mit den Anwendern erfolgen und hängt unter anderem von den speziellen Vermessungswünschen der Benutzer ab.

Es wurde eine automatische Meßablaufsplanung realisiert, die in der Lage ist, polyedrische Strukturen zu behandeln. Zwei Arten von Meßaufträgen, Distanzmessungen zwischen Strukturecken und die Bestimmung von Winkeln zwischen geraden Kanten, wurden implementiert. Zur Visualisierung der Ergebnisse wird ein Programm zur Strahlverfolgung benutzt, das die betrachteten Strukturen so abbildet, wie sie später in den REM-Aufnahmen zu sehen sind. Ferner kann die Durchführung der Meßaufträge an diesen synthetischen Bildern simuliert werden. Visualisierung und Vermessungssimulation sind unverzichtbare Hilfen sowohl bei den Entwicklungsarbeiten als auch zum Testen von erstellter Software. Es wird daher betont, daß ihre Weiterentwicklung ebenso wichtig ist wie die Entwicklungsarbeiten am System selbst. Nach den von der automatischen Meßablaufsplanung gelieferten REM-Parametern wurden Stereobilder von realen LIGA-Strukturen aufgenommen und sowohl Distanz- als auch Winkelaufträge durchgeführt.

Entwurf und Implementierung der Software erfolgten nach objektorientierten Gesichtspunkten. Dadurch wird sowohl die Erweiterungsfähigkeit hinsichtlich Geometrie und Meßaufträgen wesentlich unterstützt als auch die Wiederverwendbarkeit von Teilen der Software gewährleistet.

Es wurde bewußt darauf verzichtet, ein Vermessungssystem zu konzipieren, das in seinem Leistungsumfang auf bestimmte Geometrieformen oder bestimmte Vermessungsaufgaben festgelegt ist. Die bereits heute herstellbaren Strukturen weisen eine große Vielfalt von Formen auf, für die auch eine entsprechend große Zahl von Vermessungsaufgaben formuliert werden können. Ein System mit einem eingeschränkten Leistungsumfang zu entwickeln, bedeutet die In-

vestition eines erheblichen Arbeitsaufwands und bietet letztendlich nur eine Teillösung für die Problematik der 3D-Vermessung. Es ist abzusehen, daß die meisten Erweiterungswünsche entweder eine völlige Neukonzeption des bestehenden Systems erfordern oder aber die Entwicklung neuer Systeme, so daß schließlich mehrere unterschiedliche Systeme für unterschiedliche Vermessungsaufgaben eingesetzt werden müßten. Der in dieser Arbeit vorgeschlagene allgemeinere Ansatz bietet von vorneherein die Möglichkeit, neue Geometrien und neue Meßaufträge hinzuzufügen. Es wird ein Grundgerüst vorgegeben, an dem sich die Entwicklungsarbeiten bei einer Systemerweiterung orientieren können und so erheblich vereinfacht werden. Auch dieses System hat selbstverständlich seine Leistungsgrenzen. Es gibt für jeden Meßauftragstyp durch die Strukturgeometrie vorgegebene Situationen, in denen er nicht durchführbar ist, und umgekehrt gibt es Geometrielemente, für die bestimmte Meßauftragstypen nur in seltenen Fällen durchführbar sind. Das System kann diese Situationen erkennen und entsprechende Meßaufträge aussortieren. In vielen Fällen ist die Ursache für die Undurchführbarkeit eines Meßauftrags in der Einschränkung "Ein Stereobildpaar pro Meßauftrag" zu suchen. Auch hier ist der Weg für eine Weiterentwicklung bereits heute vorgezeichnet. Einzelne Erkennungsaufgaben von Meßaufträgen sind auf mehrere Bildpaare zu verteilen und es ist in Erwägung zu ziehen, Meßaufträge anhand von Aufnahmen aus mehr als zwei Blickrichtungen durchzuführen.

Vordringlichste Aufgabe ist die Realisierung eines vollständigen 3D-Vermessungssystems nach der hier vorgegebenen Konzeption, wonach das System ohne größere Probleme als interaktives System implementiert werden kann. Es wurde gezeigt, daß Vermessungen am Rasterelektronenmikroskop nach den Ergebnissen der Meßablaufsplanung möglich sind. Die Genauigkeit, mit der der Probenstisch des dabei eingesetzten Mikroskops gesteuert werden kann, reicht zumindest für Vermessungen in der Parallelprojektionsnäherung aus. Für dieses Mikroskop ist eine REM-Steuerung zu implementieren, es sind verschiedene Arbeiten zur Kalibrierung durchzuführen und die Ungenauigkeiten der in die 3D-Berechnungen eingehenden Größen, wie z.B. der Kippwinkel, sind zu bestimmen. Die Implementierung der Systemkomponente Vermessung kann dem gleichen Schema folgen, wie die bereits realisierte Vermessungssimulation an synthetischen Bildern. Ferner sind Benutzeroberflächen zu entwickeln, die für die Mustererkennung und für einzelne REM-Steuerungsaufgaben eine Kommunikation zwischen System und Anwender erlauben.

Um das System zu automatisieren sind größere Entwicklungsaufgaben zu bewältigen. Dies gilt vor allem für den Bereich der automatischen Mustererkennung mit Hilfe digitaler Bildanalyse. Erste Ansätze befassen sich mit dem Einsatz neuronaler Netze [66], der dadurch gerechtfertigt wird, daß klassische Methoden zur Kantenextraktion bei REM-Bildern i. allg. die Objektkonturen nicht optimal darstellen. Die Aufgaben einer automatischen Mustererkennung wurden in die Systemkonzeption so eingebunden, daß genügend Spielraum für ihre zukünftige Entwicklung besteht, ohne daß das bisherige Konzept in Frage gestellt wird. Hierzu sind sowohl für die Vorbereitung von Erkennungsoperationen als auch für ihre Durchführung Methoden der Geometrielemente vorgesehen. Im Rahmen dieser Methoden läßt sich die Mustererkennung entweder interaktiv oder automatisch durchführen.

Ferner erfordert ein vollautomatisches System auch eine automatische REM-Steuerung bei der Auftragsdurchführung. Ein modernes Rasterelektronenmikroskop kann in allen wesentlichen Funktionen über einen externen Rechner gesteuert werden. Das allein gewährleistet jedoch noch nicht die volle Automatisierbarkeit. So kann etwa davon ausgegangen werden, daß die REM-Funktion zur automatischen Fokussierung i. allg. keine ausreichende Bildqualität sicher-

stellt. Auch hier wurde bei der Systemkonzeption vorgesehen, daß der Benutzer bei einem interaktiven System Steuerungsaufgaben übernimmt. Einzelne Aufgaben können dann im Rahmen weiterführender Arbeiten automatisiert werden.

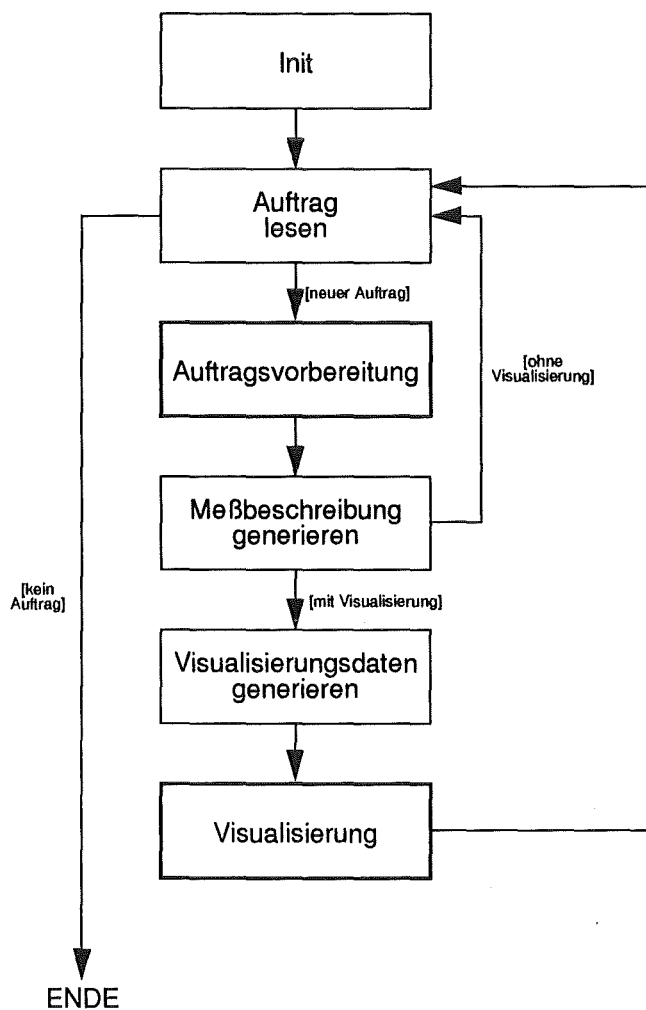
In dieser Arbeit standen Konzeption und Realisierung einer automatischen Meßablaufsplanung im Vordergrund. Die noch ausstehenden Implementierungsarbeiten für ein vollständiges interaktives System sind zwar in ihrem Umfang beträchtlich, können aber nach den Vorgaben der Systemkonzeption erledigt werden. Ferner wurden auch die Problemfelder genannt, die für die Realisierung eines vollautomatischen Systems zu bearbeiten sind.

Die Mikrostrukturtechnik ist ein Gebiet, das am Anfang seiner Entwicklung steht. Erste industrielle Anwendungen zeichnen sich ab. Noch sind die Anforderungen an die Qualitätssicherung und speziell an Vermessungsmöglichkeiten in zwei und drei Dimensionen gering und wenig konkretisiert. Wegen des hohen Komplexitätsgrades entsprechender Vermessungssysteme, der gerade auch durch das Konzept zur 3D-Vermessung belegt ist, ist ein früher Einstieg in die Entwicklungsarbeiten gerechtfertigt. Ein System, wie es hier vorgeschlagen wird, kann mit einfachen Vermessungsaufgaben und einfachen Strukturgeometrien beginnen und wegen seiner Erweiterungsfähigkeit sukzessive an steigende Anforderungen angepaßt werden.

## Anhang

Im folgenden wird die Struktur der bisher implementierten Software anhand von einfachen Ablaufdiagrammen und einer kurzen Beschreibung der einzelnen Funktionsblöcke dargestellt. In Teil I wird das Vorbereitungsprogramm beschrieben. Die Auftragsvorbereitung und die Visualisierung werden in den Teilen II und III erläutert. Teil IV beschreibt den Ablauf einer Vermessungssimulation.

### I. Vorbereitung



#### Init:

Im Hauptprogramm werden zunächst die benötigten Systemparameter initialisiert und eine Datei für die Daten der Meßbeschreibung angelegt.

#### Auftrag lesen:

Aus der Auftragsdatei wird der nächste noch nicht bearbeitete Meßauftrag eingelesen. Der erste Parameter eines Auftrags kennzeichnet seinen Typ und entscheidet, zu welcher Klasse das zu



erzeugende Auftragsobjekt gehört. Das Einlesen der übrigen Parameter ist Aufgabe einer Methode der Auftragsklasse. Da derzeit durch den Typ eines Auftrags auch der Typ seiner Bezugsobjekte festgelegt ist, ist die Operationsfolge bekannt und damit auch alle benötigten Geometrieelemente einschließlich der Grundelemente. Diese Geometrieelemente werden aus Geometriedateien (vier Dateien entsprechend den vier Haupttypen) eingelesen, wobei der erste Parameter eines Objekts seinen Typ und damit die Klasse des zu erzeugenden Objekts festlegt. Die Geometrieobjekte werden innerhalb des Auftragsobjekts in Listen (Listenklassen aus der LEDA-Bibliothek [76]) gespeichert. Jedes Geometrieelement enthält Listen für diejenigen Elemente, zu denen eine gehört zu- oder besteht aus-Beziehung besteht. Diese Objekte werden jedoch nur bei Bedarf eingelesen. Grundelemente enthalten eine weitere Liste zur Aufnahme der Oberflächen, die in einer bestimmten Umgebung liegen und evtl. das Grundelement verdecken (s. Kapitel 5.3). Auch diese Oberflächen werden hier eingelesen.

Falls die Auftragsdatei keine weiteren zu bearbeitenden Aufträge enthält, wird das Programm beendet.

#### **Auftragsvorbereitung:**

Die gesamte Vorbereitung eines Auftrags wird durch den Aufruf einer einzigen Methode aus dem Hauptprogramm gestartet. Der Ablauf dieser Vorbereitung wird in Teil II erläutert.

#### **Meßbeschreibung generieren:**

Nachdem die Methode zur Auftragsvorbereitung ihre Arbeit beendet hat, wird eine Methode des Auftrags zur Ausgabe der Vorbereitungsergebnisse in die Meßbeschreibungsdatei aufgerufen. Diese Datei enthält derzeit noch keine Geometrieelemente, die die Operationsfolge festlegen, da diese implizit durch den Auftragsstyp festgelegt ist. Für die Grundelemente (bisher müssen nur Ecken erkannt werden) wird lediglich die theoretische Position im digitalisierten Bild ausgegeben. Parameter zur Beschreibung eines Musters werden noch nicht berechnet.

Falls keine Visualisierung erfolgen soll, fährt das Programm mit dem Einlesen des nächsten Meßauftrags fort.

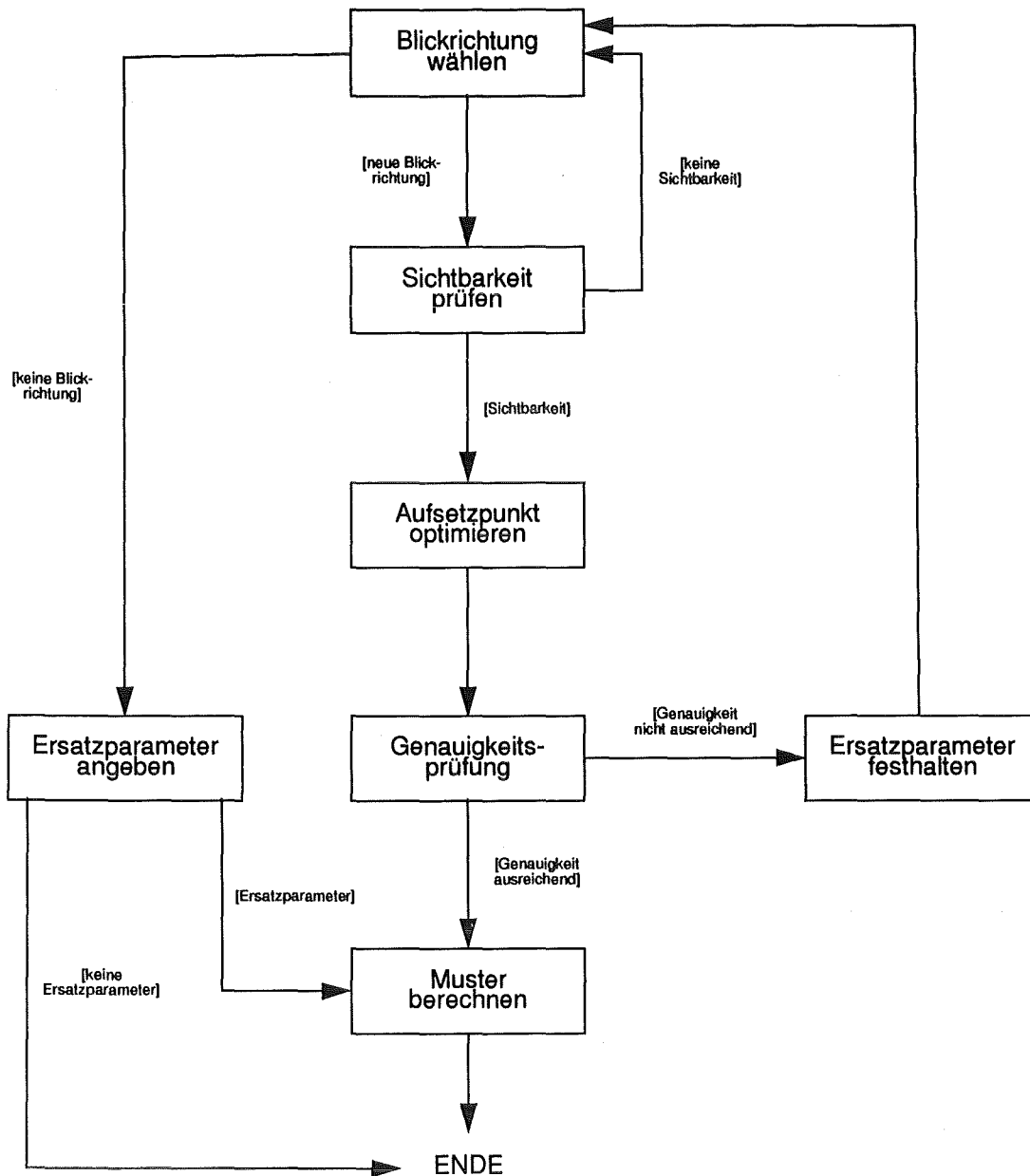
#### **Visualisierungsdaten generieren:**

Im Falle einer Visualisierung müssen dem Visualisierungsprogramm einige Daten bereitgestellt werden. Nach dem Anlegen einer entsprechenden Datei wird der Meßauftrag durch einen weiteren Aufruf seiner Ausgabemethode dazu veranlaßt, seine Daten auch in diese Datei auszugeben. Zusätzlich werden noch einige Systemparameter in diese Datei ausgegeben.

#### **Visualisierung:**

Zur Visualisierung wurde ein Programm in C++ implementiert. Der Ablauf der Visualisierung wird in Teil III dargestellt. Nach der Visualisierung fährt das Vorbereitungsprogramm mit dem Einlesen des nächsten Auftrags auf Anweisung durch den Benutzer fort.

## II. Auftragsvorbereitung



### Blickrichtung wählen:

Aus den zur Verfügung stehenden Blickrichtungen (s. Kapitel 5.3) wird jeweils eine noch nicht bearbeitete Richtung ausgewählt. Begonnen wird mit der Richtung (0,0,1) (für das linke Stereobild). Danach folgen jeweils die auf dem nächsten Breitenkreis gelegenen Richtungen. Da für jeden Auftrag einer Meßreihe die gleichen Blickrichtungen benutzt werden sollen, wird die Berechnung der Blickrichtungen in Zukunft nur einmal außerhalb der Auftragsvorbereitung berechnet und in einer Liste, entsprechend der abzuarbeitenden Reihenfolge geordnet, übergeben. Dies ist bereits in Abb. 24 in Kapitel 3.6 dargestellt. (Es ist zu beachten daß es sich jeweils um ein Paar von Blickrichtungen handelt).

**Sichtbarkeit prüfen:**

Sofern ein noch nicht bearbeitetes Blickrichtungspaar vorhanden ist, wird die Methode zum Prüfen auf Sichtbarkeit für jede Einzelrichtung und jeweils für jedes Grundelement aufgerufen. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben wurde wird im Rahmen dieser Methoden für jede in Frage kommende Oberfläche die Methode für die Verdeckungsprüfung aufgerufen. Sobald bei einem Aufruf der Sichtbarkeitsmethode eine Verdeckung gemeldet wird, kehrt das Programm zur Wahl der nächsten Blickrichtung zurück.

**Aufsetzpunkt optimieren:**

Bei einer erfolgreichen Sichtbarkeitsprüfung für alle Grundelemente und beide Einzelrichtungen wird ein optimaler Aufsetzpunkt und gleichzeitig die einzustellende Vergrößerung berechnet. Für die Vergrößerung wird hier von einem kontinuierlichen Wertebereich ausgegangen. Der Algorithmus, der in Kapitel 5.3 beschrieben wird, ist eine Methode der Basisklasse "Meßauftrag" und ist in keiner Weise vom Typ eines Auftrags abhängig. Die Grundelemente eines Auftrags stellen der Methode weitere Methoden (z.B. zum Rotieren eines Elements) zur Verfügung, die ohne Kenntnis des Grundelementtyps benutzt werden können.

**Genauigkeitsprüfung:**

Nach dem Optimieren des Aufsetzpunkts und der Berechnung der Vergrößerung hat der Meßauftrag einen vollständigen REM-Parametersatz ermittelt. Entscheidend für die Annahme dieser Parameter ist die erreichbare Genauigkeit, d.h. ob eine geforderte Sollgenauigkeit erreicht wird. Zu diesem Zweck wird eine Abschätzung der Genauigkeit auf der Grundlage des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes durchgeführt (s. auch Kapitel 5.3). Beim derzeitigen Programm übernimmt diese Aufgabe der Meßauftrag mit einer typabhängigen Methode. Dies ist möglich, weil im Rahmen der implementierten Meßaufträge die Operationsfolge vollständig durch den Auftragsstyp festgelegt ist. Nach der in Kapitel 3.6 vorgestellten Konzeption ist es in einer zukünftigen Version die Aufgabe der beteiligten Geometrielemente, jeweils für die von ihnen geforderten Operationen die Genauigkeitsabschätzung auf der Grundlage der Genauigkeitsberechnungen für die Nachfolgeoperationen durchzuführen. Bei ausreichender Genauigkeit wird der Meßauftrag als durchführbar gekennzeichnet (Attribut Status).

**Ersatzparameter festhalten:**

Für den Fall, daß die Sollgenauigkeit nicht erfüllt ist, werden die REM-Parameter als sogen. Ersatzparameter zwischengespeichert, sofern nicht bereits Ersatzparameter mit einer besseren Genauigkeit als der gerade ermittelten vorliegen. Danach fährt das Programm mit der Wahl einer neuen Blickrichtung fort.

**Muster berechnen:**

Falls REM-Parameter mit einer ausreichenden Genauigkeit gefunden wurden, wird als letzter Schritt der Vorbereitung eines Auftrags ein Muster für jedes Grundelement berechnet. Dazu besitzt jedes Grundelement eine entsprechende Methode, die unter Angabe der ermittelten REM-Parameter vom Auftrag aufgerufen werden kann. Da noch nicht bekannt ist, wie die Mustererkennung innerhalb der Systemkomponente Vermessung realisiert wird, werden außer theoreti-

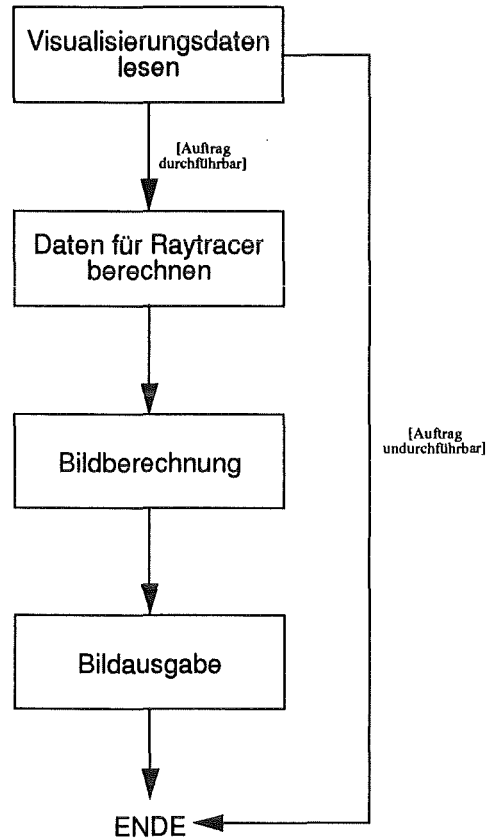
schen Bildpositionen der Ecken noch keine Parameter für die Muster der Grundelemente bestimmt. Nach der Berechnung von Mustern wird die Auftragsvorbereitung beendet.

#### **Ersatzparameter angeben:**

Falls der Auftragsvorbereitung keine weiteren Blickrichtungen mehr zur Verfügung stehen und bisher keine REM-Parameter gefunden wurden, die eine ausreichende Meßgenauigkeit zulassen, soll der Auftrag dennoch mit der bestmöglichen Genauigkeit durchgeführt werden. Hierfür wurden für Blickrichtungen ohne Verdeckung die REM-Parameter mit der höchsten Genauigkeit als Ersatzparameter festgehalten. Diese Parameter werden nun als endgültige REM-Parameter übernommen, der Auftrag wird als Auftrag mit verminderter Genauigkeit gekennzeichnet (Attribut Status) und anschließend werden Muster für die Grundelemente berechnet. Falls keine Ersatzparameter vorliegen, bedeutet das, daß es keine Blickrichtung gibt, aus der alle Grundelemente sichtbar sind. Der Auftrag kann nicht durchgeführt werden. Er wird entsprechend gekennzeichnet und die Auftragsvorbereitung wird beendet.

Die Auftragsvorbereitung ist der rechenintensivste Teil des gesamten Vermessungssystems. Das Testen vieler verschiedener Blickrichtungen kann nicht umgangen werden, wenn keine Annahmen über den Typ eines Meßauftrags, den Typ der Bezugsobjekte und die Geometrie der Strukturen in der Umgebung von Grundelementen gemacht werden sollen. Daher ist es interessant, einen Blick auf den Zeitbedarf für die Auftragsvorbereitung zu werfen. Hier ist zunächst darauf hinzuweisen, daß es natürlich möglich ist, die Rechenzeiten unabhängig von der Rechnerleistung durch die Angabe einer beliebig großen Zahl zu testender Blickrichtungen beliebig groß werden zu lassen. Der Zeitbedarf auf einer SUN-Workstation vom Typ SPARC 10/40 unter dem Betriebssystem SUN-OS Version 4.1.3 wurde für eine Teststruktur bestehend aus drei einfachen Polyedern und für insgesamt 221 Blickrichtungen ermittelt. Es kann davon ausgegangen werden, daß diese Anzahl in der überwiegenden Zahl von Fällen völlig ausreicht. Außerdem wurde maximale Genauigkeit gefordert, so daß in jedem Fall alle Blickrichtungen durchgetestet werden müssen. Das gesamte Vorbereitungsprogramm benötigt für eine Meßreihe bestehend aus fünf Aufträgen des Typs "Distanz zwischen Ecken" und fünf Aufträgen des Typs "Winkel zwischen geraden Kanten" 18 Sekunden (ca. 1 Sekunde für einen Distanzauftrag und ca. 2 Sekunden für einen Winkelauftrag).

### III. Visualisierung



#### Visualisierungsdaten lesen:

In der Visualisierungsdatei befinden sich die Daten des Auftragsobjekts sowie die Systemparameter Bildgröße, Anzahl der Pixel pro Bildzeile und Arbeitsabstand. Falls der Auftrag undurchführbar ist, wird das Programm abgebrochen.

#### Daten für Raytracer berechnen:

Das Strahlverfolgungsprogramm mtv-Raytracer [65] benötigt Daten der Oberflächen im NFF<sup>1</sup>-Format. Diese stehen in einer Datei zur Verfügung. Zusätzlich zu diesen Daten sind Parameter für die Festlegung des darzustellenden Bildausschnittes, die Ausrichtung der Szene innerhalb dieses Ausschnittes, den Ort des Betrachters, den Ort der Lichtquelle und die Auflösung erforderlich. Die Position des Betrachters entspricht dem Projektionszentrum im Mikroskop; die Lichtquelle wird an die gleiche Position gesetzt, um Schattenwurf zu vermeiden. Diese Parameter werden aus den auftragsabhängigen REM-Parametern und den Systemparametern berechnet. Ferner wird beim Distanzauftrag eine Distanzlinie zwischen den theoretischen Eckenpositionen berechnet, die später in das Bild eingeblendet wird. Die Berechnungen werden für beide Bilder eines Stereopaars durchgeführt.

---

1. Neutral File Format

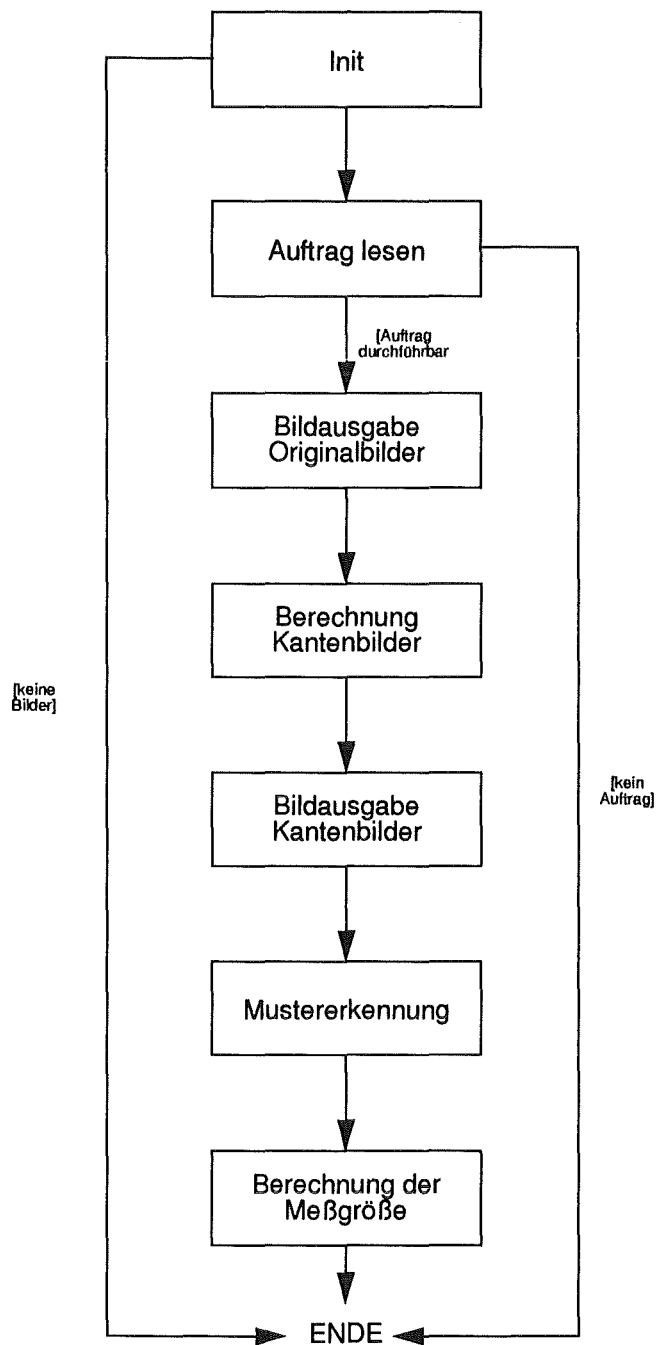
**Bildberechnung:**

Das Strahlverfolgungsprogramm mtv-Raytracer erzeugt zwei Bilder (links und rechts) mit je drei Bändern für die Farben Rot, Grün und Blau.

**Bildausgabe:**

Für die Bildausgabe werden Routinen des Bildverarbeitungssystems KHOROS [77] verwendet. Die Bilddaten des Raytracers werden in das KHOROS-eigene viff-Format transformiert. Beim Distanzauftrag wird die berechnete Distanzlinie in das Bild eingeblendet und es erfolgt die Ausgabe in Pseudofarbdarstellung auf dem Bildschirm.

#### IV. Vermessung (Simulation)



#### Init:

Im Hauptprogramm werden zunächst die Systemparameter aus einer Datei eingelesen. Die Simulation der Vermessung benutzt die Raytracing-Bilder, die bei der Visualisierung während der Vorbereitung erzeugt wurden, als Ersatz für REM-Bilder. Falls keine Bilder vorliegen wird das Programm mit einer entsprechenden Fehlermeldung beendet.

**Auftrag lesen:**

Aus der Meßbeschreibung wird der nächste noch nicht bearbeitete Meßauftrag eingelesen. Geometrielemente werden hier nicht benötigt.

Falls der Auftrag nicht durchführbar ist, wird der nächste Auftrag eingelesen. Falls die Meßbeschreibung keine weiteren zu bearbeitenden Aufträge enthält, wird das Programm beendet. Bei einem durchführbaren Meßauftrag wird der weitere Ablauf der Vermessungssimulation von einer Methode des Auftragsobjekts gesteuert.

**Bildausgabe Originalbilder:**

Ein Ausgabeprogramm des KHOROS-Systems stellt die beiden Bilder als Grauwertbilder auf dem Bildschirm dar.

**Berechnung Kantenbilder:**

Aus den Originalbildern extrahiert eine KHOROS-Routine die Kanten als ein Pixel breite Linien. Zur besseren Darstellung werden diese Linien durch Mittelwertbildung etwas verbreitert.

**Bildausgabe Kantenbilder:**

Die beiden Kantenbilder werden auf dem Bildschirm dargestellt. Das KHOROS-Ausgabeprogramm besitzt eine Zoom-Funktion, mit der Bildausschnitte bei der nachfolgenden interaktiven Bestimmung der Eckenpositionen vergrößert werden können.

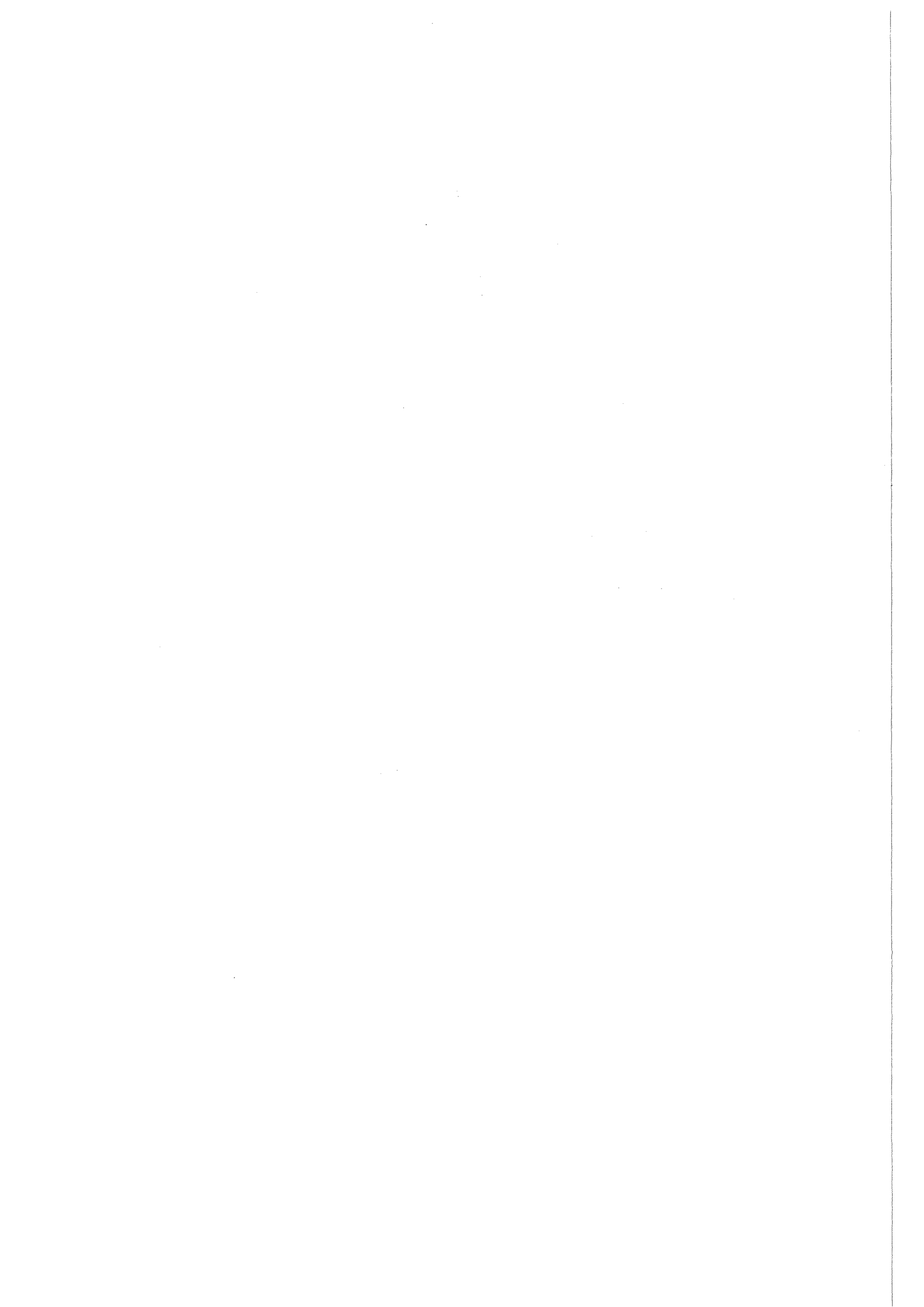
**Mustererkennung:**

Die Mustererkennung ist hier auf die Ermittlung der Eckenpositionen in beiden Bildern durch den Benutzer reduziert. Diese Positionen werden dem Programm übergeben.

**Berechnung der Meßgröße:**

Aus den Eckenpositionen in beiden Bildern werden mit (2.1) die 3D-Positionen bestimmt. Abhängig vom Auftragstyp wird die Meßgröße berechnet.





## Literatur

- [1] Y. Tarui: *VLSI Technology, Fundamentals and Application*; Springer-Verlag, Berlin, 1986, S. 172-192
- [2] W. Hilberg: *Grundprobleme der Mikroelektronik*; Oldenbourg Verlag, München, 1982
- [3] E.W. Becker, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer: *Production of Separation-Nozzle Systems for Uranium Enrichment by a Combination of X-Ray Lithography and Galvanoplastics*; *Naturwissenschaften* 69, 1982, S. 520-523
- [4] W. Ehrfeld, E.W. Becker: *Das LIGA-Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturkörpern mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe*; *KfK-Nachrichten* 19 4/87, 1987, S. 167-179
- [5] P. Bley, J. Göttert, M. Harmening, M. Himmelhaus, W. Menz, J. Mohr, C. Müller, U. Wallrabe: *The LIGA Process for the Fabrication of Micromechanical and Microoptical Components*; H. Reichl (ed.), *Micro Systems Technologies '91*, VDE-Verlag Berlin, 1991, S. 302-314
- [6] W. Menz, P. Bley: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*; VCH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, 1993
- [7] J. Mohr, P. Bley, C. Burbaum, U. Wallrabe: *Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen mit dem LIGA-Verfahren*; *KfK-Nachrichten* 23, 2-3/91, 1991, S. 110-117
- [8] H. Guckel, K.J. Skrobis, T.R. Christenson, J. Klein, S. Han, B. Choi, E.G. Lovell, T.W. Chapman: *Fabrication and testing of the planar magnetic micromotor*; *J. Micromech. Microeng.*, 1, 1991, S. 135-138
- [9] A. El-Kholi, W. Bacher, B. Menz, J. Mohr, R. Stransky: *Entwicklungen und Erweiterungen der Strukturierungsmöglichkeiten der Röntgentiefenlithographie*; 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, September 1993, *KfK-Bericht* 5238, S. 114-119
- [10] W. Menz: *Die LIGA-Technik und ihr Potential für die industrielle Anwendung*; 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, September 1993, *KfK-Bericht* 5238, S. 19-28
- [11] R. Ruprecht, W. Bacher, P. Bley, M. Harmening, W.K. Schomburg: *Herstellung von Infrarotfiltern für das Weltraumobservatorium ISO mit Hilfe des LIGA-Verfahrens*; *KfK-Nachrichten* 23 2-3/91, 1991, S. 118-123
- [12] B. Anderer, W. Ehrfeld, J. Mohr: *Grundlagen für die röntgentiefenlithographische Herstellung eines planaren Wellenlängen-Demultiplexers mit selbstfokussierendem Reflexionsgitter*; *KfK-Bericht* 4702, März 1990
- [13] C. Burbaum, J. Mohr: *Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik*; *KfK-Bericht* 4859, April 1991

- [14] U. Wallrabe, P. Bley, J. Mohr: *Entwicklung, Optimierung und Test von elektrostatischen Mikromotoren nach dem LIGA-Verfahren*; KfK-Bericht 5088; September 1992
- [15] K.E. Petersen: *Silicon as a Mechanical Material*; Proc. IEEE, Vol. 70, 1982, S. 420-457
- [16] A. Heuberger (Hrsg.): *Mikromechanik*; Springer-Verlag, Berlin, 1989
- [17] W. Bier, A. Guber, G. Linder, T. Schaller, K. Schubert: *Mechanische Mikrofertigung - Verfahren und Anwendungen*; 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, September 1993, KfK-Bericht 5238, S. 132-137
- [18] J. Schulz, J. Mohr: *Optische Lithographie als Strukturierungsmethode der Mikro-technik und spezielle Anwendungen für den LIGA-Prozeß*; 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, September 1993, KfK-Bericht 5238, S. 127-131
- [19] B. Bürg, H. Guth, A. Hellmann: *Bildanalytische Qualitätskontrolle in der Mikrofertigung: Ein vollautomatisches, hochflexibles und schnelles Strukturmeßsystem*; 11. DAGM-Symposium, Hamburg, Oktober 1989, Informatik-Fachberichte 219, Springer-Verlag, S. 168-172
- [20] B. Bürg, H. Guth, A. Hellmann: *COSMOS-2D: Ein System zur Verifikation und Vermessung von zweidimensionalen geometrischen Formen*; KfK-Nachrichten 23, 2-3/91, 1991, S.100-109
- [21] B. Bürg, H. Guth, A. Hellmann: *Parametric Optical Measurement of Micromechanical Structures with arbitrary plane Surface Geometries: The COSMOS-2D-System*; H. Reichl (ed.), Micro Systems Technologies '91, VDE-Verlag Berlin, 1991, S. 280-287
- [22] H. Andriessen, B. Bürg, H. Guth, A. Hellmann: *Heuristisches Mustererkennungsverfahren zur Verifikation zwei-dimensionaler Bildobjekte*; KfK-Bericht 4799, 1990
- [23] B. Bürg: *Parametrisches optisches Messen bei der Herstellung von Mikrostrukturen mit beliebiger, ebener Oberflächengeometrie*; Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, 1991
- [24] H. Trauboth: *Aufgaben der Informationsverarbeitung in der Mikrosystemtechnik*; 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, September 1993, KfK-Bericht 5238, S. 36-47
- [25] U. Stucky, H. Guth, B. Bürg, A. Hellmann: Unveröffentlichter Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Februar 1992
- [26] H.J. Tiziani: *Optische Verfahren zur Abstands- und Topographie-Bestimmung*; Informationstechnik, 33, 1991, S. 5-14
- [27] C.J.R. Shepard, D.K. Hamilton, I.J. Cox: *Optical microscopy with extended depth of field*; Proc. R. Soc. Lond., A 387, 1983, S. 171-186
- [28] T.R. Corle, G.S. Kino: *Differential Interference Contrast Imaging on a Real Time Confocal Scanning Optical Microscope*; Appl. Optics, Vol. 29, No. 26, 1990, S. 3769-3774

- [29] G.Q. Xiao, T.R. Corle, G.S. Kino: *Real-time Confocal Scanning Optical Microscopy*; Appl. Phys. Lett., 53, 1988, S. 716-718
- [30] J.M. Guerra: *Photon Tunneling Microscopy*; Appl. Optics, Vol. 29, No. 26, 1990, S. 3741-3752
- [31] D. Courjon, J.-M. Vigoureux, M. Spajer, K. Sarayedine, S. Leblanc: *External and Internal Reflexion Near Field Microscopy: Experiments and Results*; Appl. Optics, Vol. 29, No. 26, 1990, S. 3734-3740
- [32] W.H. Steel: *Interferometry*; 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1983
- [33] D. Pantzer, J. Politch, L. Ek: *Heterodyne Profiling Instrument for the Angstrom Region*; Appl. Optics, Vol. 25, No. 22, 1986, S. 4168-4172
- [34] G.E. Sommargren: *Optical Heterodyne Profilometry*; Appl. Optics, Vol. 20, No. 4, 1981, S. 610-618
- [35] H.J. Tiziani: *Optical methods for precision measurements*; Opt. and Quantum Electronics, 21, 1989, S. 253-282
- [36] R. Jones, C. Wykes: *Holographic and Speckle Interferometry*; 2nd edition, Cambridge University Press, 1989
- [37] R.K. Erf: *Application of Laser Speckle to Measurement*; in "Laser Applications", J.W. Goodman, M. Ross (eds.), Academic Press, 1980, S. 1-69
- [38] K. Leonhardt, K.-H. Rippert, H.J. Tiziani: *Optische Mikroprofilometrie und Rauheitsmessung*; Technisches Messen tm, 54, 6, 1987, S. 243-252
- [39] B.S. Lee, T.C. Strand: *Profilometry with a Coherence Scanning Microscope*; Appl. Optics, Vol. 29, No. 26, 1990, S. 3784-3788
- [40] M. Davidson, K. Kaufman, I. Mazor, F. Cohen: *An application of interference microscopy to integrated circuit inspection and metrology*; SPIE, Vol. 775, 1987, S. 233-247
- [41] G.S. Kino, S.S.C. Chim: *Mirau Correlation Microscope*; Appl. Optics, Vol. 29, No. 26, 1990, S. 3775-3783
- [42] M. Davidson, K. Kaufman, I. Mazor: *First Results of a Product Utilizing Coherence Probe Imaging for Wafer Inspection*; SPIE, Vol. 921, 1988, S. 100-114
- [43] H.J. Tiziani: *Automatisierung der optischen Qualitätsprüfung*; Technisches Messen tm, 55, 12, 1988, S. 481-491
- [44] P.J. Besl: *Active Optical Range Imaging Sensors*; in "Advances in Machine Vision: Architectures and Applications", J. Sanz (ed.), Springer-Verlag, New York, 1988, S. 1-63
- [45] M.R. Howells, J. Kirz, D. Sayre: *Röntgenmikroskopie*; Spektrum der Wissenschaft, 4/1991, S. 70-77

- [46] P.J. Duke, A.G. Michette (eds.): *Modern Microscopies: Techniques and Applications*; Plenum Press, 1990, S. 41-57
- [47] C.F. Quate: *The Acoustic Microscope*; *Scientific American*, 241, 1979, S. 58-66
- [48] H.K. Wickramasinghe, C.R. Petts: *Gas Medium Acoustic Microscopy*; J. Heiserman: *Cryogenic Acoustic Microscopy*; in "Scanned Image Microscopy", E.A. Ash (ed.), Academic Press, New York, 1980, S. 57-96
- [49] P. Günther, U.Ch. Fischer, K. Dransfeld: *Scanning Near Field Acoustic Microscopy*; *Appl. Phys.*, B 48, 1989, S. 89-92
- [50] H. Fuchs: *Strukturen - Farben - Kräfte: Wanderjahre der Raster-Tunnel-Mikroskopie*; *Phys. Bl.* 45, Nr. 4, 1989, S. 105-115
- [51] D.W. Pohl: *SXM - Rastermikroskopien für x-beliebige Oberflächen*; *Phys. Bl.* 47, Nr. 6, 1991, S. 517-520
- [52] J.W.S. Hearle, J.T. Sparrow, P.M. Cross: *The Use of the Scanning Electron Microscope*; Pergamon Press, 1972
- [53] L. Reimer: *Scanning Electron Microscopy*; Springer Series in Optical Sciences, Vol. 45, Springer-Verlag, 1985
- [54] H. Johannsen, U. Werner: *Scanning Electron Microscopy: Electron-optical and technical fundamentals of the instrument*, in "Electron Microscopy in Solid State Physics", H. Bethge, J. Heydenreich (eds.), Elsevier, 1987, S. 143-169
- [55] N. Nomura, T. Koizumi, K. Harafuji: *Submicron 3-dimensional Structure Observation by Cyclotron SEM*; Digest of Papers, 4th MicroProcess Conference 1991, Kanazawa, Japan, S. 142 ff.
- [56] J. Mohr, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer: *Analyse der Defektursachen und der Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung*; KfK-Bericht 4414, 1988
- [57] A. Boyde: *Quantitative Photogrammetric Analysis and Qualitative Stereoscopic Analysis of SEM Images*; *J. of Microscopy*, Vol. 98, 3, 1973, S. 452-471
- [58] P.G.T. Howell: *Taking, Presenting and Treating Stereo Data from the SEM*; IITRI/SEM, 1975, S. 697-706
- [59] J.B.F. Cripps, H. Sang: *Stereo Height Measurements in Scanning Electron Microscopy*; *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 41, No. 12, 1970, S. 1825-1827
- [60] N. Bonnet, C. Quintana, P. Favard, N. Favard: *Three-dimensional graphical reconstruction from HVEM stereoviews of biological specimens by means of a microcomputer*; *Biology of the Cell*, 55, 1985, S. 125-138
- [61] G.S. Lane: *The application of stereographic techniques to the scanning electron microscope*; *J. of Scientific Instruments (J. Phys. E)*, 2, Vol. 2, 1969, S. 565-569
- [62] I. Stoev, S. Simov, E. Simova, N. Bonnet, G. Balossier: *Scanning Electron Microscopy of the Geometry of V-groove Structures*; *Sensors and Actuators*, 12, 1987, S. 1-7

- [63] S. Simov, E. Simova, B. Davidkov: *Electron microscope study of the surface topography by geometrical determination of metric characteristics of surface elements*; J. of Microscopy, Vol. 137, 1985, S. 47-55
- [64] P. Haberäcker: *Digitale Bildverarbeitung - Grundlagen und Anwendungen*; Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2. Auflage, 1987
- [65] M.T. VandeWettering: *mtv-Raytracer*; Public-Domain-Software zur Erzeugung synthetischer Bilder nach dem Strahlverfolgungsverfahren, University of Oregon, 1989
- [66] M. Goik, H. Guth, U. Stucky, C. Döpmeier: Unveröffentlichter Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1993
- [67] S.G. Roberts, T.F. Page: *A micromputer-based system for stereogrammetric analysis*; J. of Microscopy, 124, 1981, S. 77-88
- [68] H. Guth, C. Döpmeier, M. Goik, A. Hellmann, U. Stucky: *Automatische Vermessung von 2D- und 3D-LIGA-Strukturen zur Qualitätskontrolle*; 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, September 1993, KfK-Bericht 5238, S. 176-182
- [69] Normenausschuß Maschinenbau (NAM) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *Initial Graphics Exchange Specification (IGES) Version 5.1*; 1991
- [70] E.G. Schlechtendahl: *STEP/EXPRESS/STEP-Datei - Das aktuelle Schlagwort*; Informatik-Spektrum, 14, 2, 1991, S. 104-106
- [71] K.-P. Scherer, I. Brauch, H. Eggert, P. Stiller: *Object Oriented Modelling of Different Knowledge Domains inside the LIGA-Process*; System, Man and Cybernetics Conference (SMC), IEEE, Le Touquet/France, Oktober 1993, Vol. 4, S. 429-434
- [72] U. Stucky: Unveröffentlichter Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1993
- [73] I. Brauch, H. Eggert, K.-P. Scherer, P. Stiller: *Einsatz wissensbasierter Methoden für Konstruktion, Fertigung und Test von LIGA-Mikrostrukturen*; 22. GI-Jahrestagung, Karlsruhe 1992, W. Görke (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, 1992, S. 714-721
- [74] M. Stefik, D.G. Bobrow: *Object-Oriented Programming: Themes and Variations*; AI Magazine, 6(4), 1986, S. 40-62
- [75] T. Budd: *An Introduction to Object-Oriented Programming*; Addison-Wesley Publishing Company, 1991
- [76] S. Näher: *LEDA User Manual*, Max-Planck-Institut für Informatik, Saarbrücken, 1990
- [77] The Khoros Group, Department of Electrical and Computer Engineering, University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131: *Khoros Manual*, Version 1.0, 1990
- [78] J. Hoschek, D. Lasser: *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*; B.G. Teubner, Stuttgart, 1992
- [79] H.-J. Kunze: *Physikalische Meßmethoden*; B.G. Teubner, Stuttgart, 1986

- [80] Technische Berichte des BMFT-Verbundvorhabens "Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikrosystementwurf", 1993

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1991-1993 am Institut für Angewandte Informatik (IAI) des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) im Rahmen eines Doktorandenstipendiums. Sie wurde fachlich betreut von Herrn Prof. Dr. W. Menz, Leiter des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT) des KfK, dem ich sehr herzlich danke für die Übernahme des Referats und die Gespräche und Hinweise, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Herzlich danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. H. Trauboth, Leiter des IAI, der zur Übernahme des Korreferats bereit war und die Durchführung der Arbeit stets unterstützt hat.

Ferner gilt mein Dank Herrn Dr. H. Eggert, der diese Arbeit in der Abteilung Mikrosysteminformatik des IAI ermöglicht hat, sowie allen Mitarbeitern der Abteilung. Ihre ständige Bereitschaft zu Gesprächen und Diskussionen lieferte wesentliche Impulse für diese Arbeit. Ich danke besonders den Mitarbeitern in der Bildverarbeitungsgruppe, Dr. H. Guth, Dr. C. Düpmeier, A. Hellmann, M. Goik und Dr. B. Bürg, die mit ihrer Hilfe bei der Bewältigung zahlreicher kleinerer und größerer Probleme den Fortgang der Arbeiten positiv beeinflussten.

Besonderer Dank gebührt auch Herrn G. Schüler (IMT), dessen Hilfsbereitschaft und Fachwissen auf dem Gebiet der Rasterelektronenmikroskopie wertvolle Beiträge geliefert hat. Ebenso möchte ich Herrn Dr. W. Schomburg (IMT) danken, der die Arbeiten am Rasterelektronenmikroskop unterstützt hat.