**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 91 (2000)

**Heft:** 9

**Artikel:** Bildsensoren in der Mikrorobotik

**Autor:** Bärkle, Axel / Schmoeckel, Ferdinand / Fatikow, Sergej

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-855544

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 10.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Bildsensoren in der Mikrorobotik

Der Aufbau einer flexiblen mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation ist eine disziplinübergreifende Aufgabe und stellt eine grosse Herausforderung für Forscher dar, die auf den Gebieten Mikrosystemtechnik, Robotik und Informatik arbeiten. An der Universität Karlsruhe wurde solch eine Station entwickelt, deren bildbasierte Sensorik einen wichtigen Teilaspekt darstellt.

Mikroroboter sind das Ergebnis der wachsenden Forschungsaktivitäten an der Schnittstelle zwischen Mikrosystemtechnik (MST) und Robotik. Wie konventionelle Roboter stellen Mikroroboter ein komplexes System dar, das in der Regel mehrere verschiedene Aktor- und Sensortypen umfasst und Algorithmen der Signal- und Informationsverarbeitung in Anspruch nimmt. Besonderer Wert wird auf die Fähigkeit von Mikrorobotern gelegt, feinste Manipulationen mit verschiedenartigen, sehr kleinen Objekten durchzuführen und gleichzeitig grössere Distanzen zu überwinden. Die Vereinigung von Mobilität und Mikromanipulationsfähigkeit erlaubt es, flexible, universell einsetzbare Mikroroboter aufzubauen. Ein wichtiger Anwendungsbereich ist die automatisierte Montage von Mikrosystemen.

**Adresse der Autoren**
Dipl.-Inform. *Axel Bürkle,* Dipl.-Ing. *Ferdinand Schmoeckel* und PD Dr.-Ing. *Sergej Fatikow,* Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), D-76128 Karlsruhe.
Axel Bürkle und Ferdinand Schmoeckel sind wissenschaftliche Mitarbeiter der Forschungsgruppe «Mikromechatronik und Mikrorobotik» am Institut für Prozessrechentechnik, Sergej Fatikow ist Privatdozent und Leiter dieser Gruppe.

## Flexible mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation

Der Aufbau einer flexiblen mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation (FMMS) ist das übergreifende Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeit [1–3]. Das Stationskonzept beruht auf dem Einsatz piezoelektrisch angetriebener Roboter von der Grösse einiger Kubikzentimeter.

Diese Roboter sind kostengünstig im Vergleich zu konventionellen Mikromanipulations-Systemen und sehr flexibel einsetzbar. Im Gegensatz zu fernbedienten Robotersystemen gibt es in der aufgebauten Station im Normalfall keine unmittelbare Verbindung zwischen dem Bediener und dem agierenden Roboter: Die Roboteraktionen werden gesteuert oder, bei komplexen Aufgaben, geregelt durchgeführt. Der Mensch entsendet quasi den kleinen künstlichen «Helfer» direkt in den Arbeitsraum und versucht dadurch, seine eigene begrenzte Manipulationsfähigkeit zu verbessern. Die Befehle des Bedieners werden mit Hilfe eines intelligenten Steuerungssystems an die Roboteraktoren in einer geeigneten Form weitergegeben. Der Abstraktionsgrad der Befehle wird durch die Leistungsfähigkeit des Steuerungssystems bestimmt. Mehrere Mikroroboter können in einer solchen Anlage gleichzeitig tätig sein.

Zwei Betriebsarten sind vorgesehen (Bild 1): Der gesamte Prozess läuft je nach Anwendungsfall entweder unter einem Lichtmikroskop oder in der Vakuumkammer eines Rasterelektronenmikroskops (REM) ab. Ein motorisierter Positioniertisch mit zwei Freiheitsgraden in der x/y-Ebene und eine darauf angebrachte Glas- bzw. Metallplatte bilden das Arbeitsfeld der Station. Die Mikroroboter bewegen sich auf der Platte, fernbedient oder völlig autonom, mit Hilfe von Sensoren.

## Sensorkonzept

Auf Grund der sehr kleinen Schrittweite der Mikroroboter ist die bei mobilen Robotern häufig eingesetzte Methode der Odometrie (Koppelnavigation) zur Positionsbestimmung nicht geeignet. Die systembedingten Abweichungen sind im Verhältnis zur Schrittweite so gross, dass sie sich schnell zu einem nicht tolerierba-

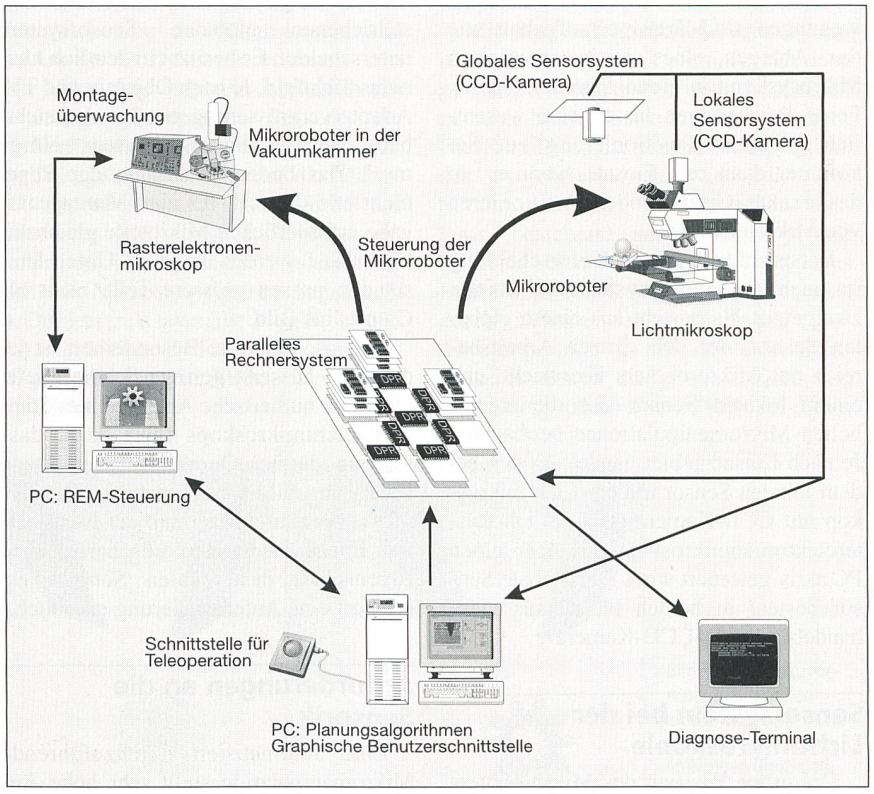
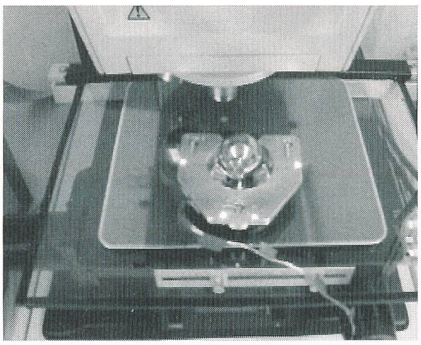



**Bild 1** Komponenten der flexiblen mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation



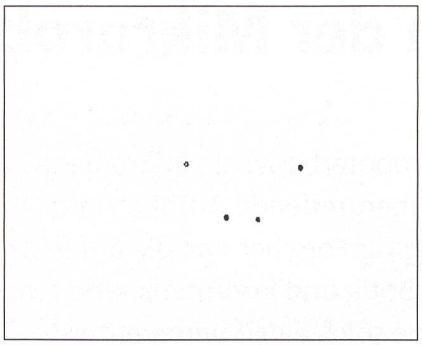


**Bild 2 (links): Positionsbestimmung des Mikroroboters anhand von Leuchtdioden. – Bild 3 (rechts): Die LED werden durch einen Segmentierungsalgorithmus lokalisiert.**

ren Fehler akkumulieren würden. Dieser Sachverhalt macht auch deutlich, dass die Bewegung des Roboters geregelt werden muss. Von entscheidender Bedeutung ist dabei der Entwurf des Sensorsystems. Da sich interne Sensoren als ungeeignet erwiesen haben, werden Position und Orientierung durch externe Sensoren erfasst. Der Verzicht auf interne Sensoren bringt darüber hinaus die weiteren Vorteile der Kostenersparnis und der besseren Eignung für den Einsatz im REM (Vakuum, elektrisches Feld) mit sich.

Bei der Robotersteuerung kann unterschieden werden zwischen groben und feinen Roboterbewegungen, die jeweils über ein globales (grob auflösendes) bzw. lokales (fein auflösendes) Sensorsystem erfasst werden. Grobbewegungen erlauben eine hohe Geschwindigkeit, sind aber mit einer geringeren Positioniergenauigkeit verbunden. Beispiele für grobe Bewegungen sind Transportaufgaben wie das Ablegen eines fertig montierten Mikrosystems in einen Sammelbehälter. Feine Bewegungen lassen eine wesentlich genauere Positionierung zu. Sie kommen dann zum Einsatz, wenn es um das exakte Greifen oder Positionieren von Mikroteilen geht.

Entsprechend dieser Unterscheidung ist auch das Sensorsystem der Station zweigeteilt. Es besteht aus einem globalen Sensor, der den ganzen Arbeitsbereich des Mikroroboters überwacht, und einem lokalen Sensor, der die eigentlichen Mikromanipulationen beobachtet. Je nach Einsatzgebiet handelt es sich bei dem lokalen Sensor um ein Lichtmikroskop mit CCD-Kamera oder um ein Rasterelektronenmikroskop, das über einen PC aktiv gesteuert wird. Der globale Sensor besteht in beiden Fällen aus einer handelsüblichen CCD-Kamera.

## Sensorsystem bei der Lichtmikroskopie

Die grobe Position des Mikroroboters wird anhand von Infrarot-Leuchtdioden bestimmt, die auf seiner Plattform angebracht sind. In Bild 2 ist der Prototyp «Miniman III» mit eingeschalteten LED ersichtlich. Deren Bildkoordinaten werden mit Hilfe eines gebietsbasierten, auf der Methode des «Pyramid Linking» [4] beruhenden Segmentierungsalgorithmus bestimmt. Bild 3 zeigt die segmentierten LED. Das eingesetzte Verfahren hat sich als sehr robust gegenüber Reflexionen und wechselnden Lichtverhältnissen erwiesen. Die 2D-Bildkoordinaten lassen sich direkt in die zugehörigen 3D-Weltkoordinaten der LED transformieren, da sich die z-Koordinate aus der aktuellen Höhe des Positioniertischs ergibt.

Das lokale Sensorsystem dient dazu, die Feinbewegungen des Roboters zu überwachen. Es besteht aus Mikroskop und aufmontierter CCD-Kamera. Diese Kombination führt zu einem System, das sich in einigen Punkten vom zuvor beschriebenen globalen Sensorsystem unterscheidet. Es besitzt ein deutlich kleineres Sichtfeld. Je nach Objektiv und TV-Adaptervergrösserung beträgt der sichtbare Bildausschnitt höchstens einige mm². Das bedeutet, dass in der Regel nicht alle der z.B. für eine Montageaufgabe erforderlichen Mikroteile gleichzeitig erfasst werden können. Unter Umständen passen grössere Teile nicht als Ganzes ins Bild.

Die gravierendste Besonderheit ist jedoch die äusserst geringe Schärfentiefe. Die hohe numerische Apertur eines Standard-Lichtmikroskops führt dazu, dass nur ein dünner Querschnitt der Szene scharf abgebildet werden kann. Die Bereiche über- und unterhalb der fokussierten Ebene erscheinen unscharf. Diese Eigenschaft des lokalen Sensors erschwert eine Automatisierung erheblich.

## Anforderungen an die Sensorik

Eine automatisiert durchzuführende Mikromanipulation stellt sehr hohe Anforderungen an die Sensorik. Dabei sind zwei Betriebsmodi zu unterscheiden: Online- und Offline-Einsatz. Im Online-Betrieb, d.h. während der Roboteraktion, hat die Sensorik die Aufgabe, Position und Orientierung von Mikrogreifer und Mikroobjekten zu liefern. Die Sensordatenauswertung ist somit Bestandteil der Positionsregelung und muss entsprechend schnell sein. Der Offline-Betrieb erlaubt eine Lockerung dieser strengen Geschwindigkeitsanforderungen. Beispielsweise sind für die Qualitätskontrolle eines montierten Mikrosystems Verarbeitungszeiten im Bereich von einigen Sekunden annehmbar.

In beiden Betriebsarten sind sehr hohe Genauigkeiten gefordert. Diese sind beim Lichtmikroskop auf Grund physikalischer Beschränkungen (Welleneigenschaft des Lichts) auf etwa einen halben Mikrometer limitiert. Für Anwendungen, die einer höheren Auflösung bedürfen, steht das Rasterelektronenmikroskop zur Verfügung. Neben Zuverlässigkeit und Robustheit soll die Sensorik, die sowohl aus Hardware als auch aus Software besteht, so flexibel sein, dass sie leicht an neue Anwendungsgebiete angepasst werden kann. Besonders problematisch sind dabei die Klassifikation und die Positionsbestimmung von Mikroobjekten. Das System soll einerseits so allgemein sein, dass Objekte unterschiedlichster Form und Beschaffenheit erkannt werden können, und andererseits so schnell, dass eine Echtzeitverarbeitung möglich ist. Nach heutigem Stand der Technik schliessen sich diese beiden Anforderungen gegenseitig aus. Die in der Industrie (meist zu Inspektionszwecken) eingesetzten Bildverarbeitungssysteme sind auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten.

Um den beiden Anforderungen Geschwindigkeit und Flexibilität dennoch gerecht zu werden, wurde ein zweigeteiltes Objekterkennungssystem gebaut. Die erste Stufe wird vor Beginn der Greiferregelung durchgeführt. Sie analysiert die Szene, indem Merkmale extrahiert und mit bekannten Merkmalen der in einer Datenbank gespeicherten Objekte verglichen werden. Als Ergebnis erhält man für alle bekannten Objekte einen Wert, der angibt, ob sich das Objekt ganz, teilweise oder überhaupt nicht im Sichtfeld des Mikroskops befindet. Zudem werden Position und Orientierung der gerade sichtbaren Objekte bestimmt.

Die zweite Stufe kommt während der Greiferregelung zum Einsatz. Hier werden die in Stufe 1 gewonnenen Informationen verwendet, um lediglich die Position der bekannten Objekte zu aktualisieren (Tracking). Mit dem Vorwissen über

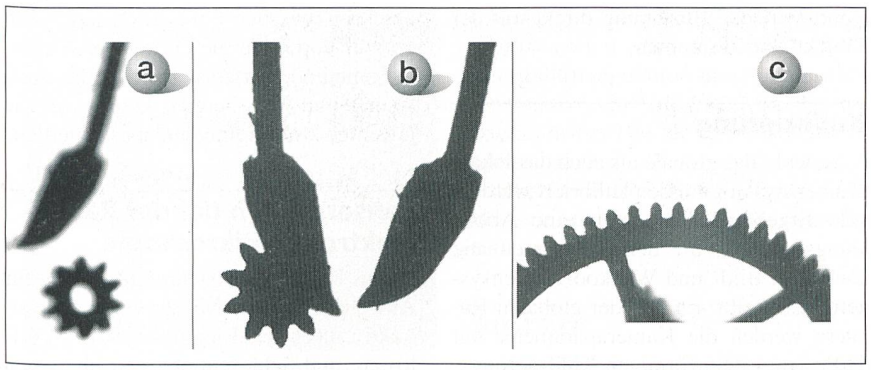



**Bild 4** Problemfälle bei der Objekterkennung: unscharfe Konturen (links), Verdeckung von Objektteilen (Mitte), unvollständig sichtbare Objekte (Uhrenzahnrad, rechts)

Sichtbarkeit und Lage zum Zeitpunkt der letzten Messung kann die Positionsbestimmung wesentlich beschleunigt werden.

Bild 4 zeigt typische Situationen, welche die Objekterkennung erschweren. Dazu gehören die erwähnten schärfentiefebedingten unscharfen Objektkonturen, eine Überlappung von Objekten und unvollständig sichtbare Objekte auf Grund des kleinen Mikroskopsichtfeldes.

Dem Problem der Unschärfe wird mit einer Methode zur Erhöhung der Schärfentiefe begegnet: Bei der Multifokussierung [5] wird eine Fokus-Serie der Szene aufgenommen, d.h. man erzeugt eine Folge von Mikroskopbildern, bei denen die scharfgestellte Ebene schrittweise durch Verfahren des Mikroskoptisches verschoben wird. Durch Kombination der scharfen Bereiche der einzelnen Schichtaufnahmen erhält man ein scharfes Bild. Je nach Anzahl der Schichten benötigt diese Methode jedoch so viel Zeit, dass sie für Echtzeitanwendungen nicht in Frage kommt. Es lässt sich jedoch bereits aus zwei Schichtaufnahmen ein scharfes Bild berechnen, wie Bild 5 zeigt. Im Bild links ist das Mikroteil scharf abgebildet, während der Greifer nur schwer auszumachen ist. Die mittlere Aufnahme zeigt den fokussierten Greifer und das unscharfe Zahnrad. Der Multifokussierungsalgorithmus kombiniert beide Bilder zu einem Bild, in dem beide Objekte scharf abgebildet sind (rechts). Dieses fokussierte Bild kann anschliessend als Eingabe für die Objekterkennung verwendet werden.

## Gewinnung von Tiefeninformation durch Triangulation

Eine ganz wesentliche Anforderung an die Sensorik blieb bisher unerwähnt: die Tiefenmessung. Das beschriebene Sensorsystem aus Mikroskop und CCD-Kamera liefert nur 2D-Informationen aus dem Arbeitsraum. Für die Durchführung von Mikrooperationen reicht dies jedoch in der Regel nicht aus.

Ein in der Makrowelt sehr häufig eingesetztes, einfaches und effektives Verfahren zur Abstandsmessung ist die Triangulation [6]. Triangulationssensoren sind schnell und preisgünstig, da sie im Wesentlichen nur aus einem Lasermodul und einem CCD-Sensor bestehen. Mit dem Mikroskop steht ein hochauflösendes und genaues optisches Sensorsystem zur Verfügung, so dass es sich anbietet, das Triangulationsprinzip auf die Mikrowelt zu übertragen. Dazu wurde das Mikroskop um einen Linienlaser erweitert, der über einen Mikropositioniertisch am Mikroskopgehäuse angebracht ist. Der Laser (Klasse 3B, 14 mW, $\lambda = 635$ nm) ist mit einer Zylinderlinse ausgestattet, die den Laserstrahl zu einer Ebene auffächert.

Das Lasermodul ist an einem Mikropositioniertisch (Bild 6) angebracht, der von einem piezoelektrischen Linearmotor [7] angetrieben wird. Der Piezomotor ermöglicht eine schnelle (bis zu 250 mm/s) und hochgenaue Positionierung des Lasers. Der Tisch ist mit einem optischen Linearmesssystem ausgerüstet, dessen Auflösung und Genauigkeit 0,1 µm bzw. 1 µm betragen. Der Tisch kann Lasten von bis zu 50 N transportieren und besitzt einen Verfahrweg von 30 mm. Eine umfangreiche Befehlsliste erlaubt seine Ansteuerung über die RS232-Schnittstelle.

Bild 7 zeigt die Integration des Lasers in das Mikroskop. Der Positioniertisch bewegt sich mit dem Mikroskoptisch. Dadurch ist bei Änderung der Mikroskop-Fokuseinstellung keine Neuausrichtung des Lasers nötig.

## Messprinzip

Das Messprinzip beruht auf dem Lichtschnittverfahren, einer Sonderform der Triangulation. Während bei der herkömmlichen Triangulation nur ein Einzelpunkt vermessen wird, erfasst das Lichtschnittverfahren mit einer Messung eine Reihe von Punkten. Das Prinzip ist in Bild 8 schematisch dargestellt. Der Laser projiziert eine Lichtebene auf das zu vermessende Objekt. Die Schnittlinie wird von der Mikroskopkamera erfasst und ermöglicht Rückschlüsse auf das Objektprofil.

Mit dem beschriebenen Aufbau können auf zwei Arten Tiefeninformationen gewonnen werden. Die erste ist die allgemeine Methode wie in Bild 8 skizziert. Hierfür müssen die genaue Laserposition, der Projektionswinkel und die Abbildungsparameter des optischen Systems, bestehend aus Mikroskop und Kamera, bekannt sein. Das Urbild eines Punktes p' im Kamerabild ergibt sich durch Schnitt der zugehörigen Projektionsgeraden g mit der Laserlichtebene E. Durch die grosse Anzahl von Parametern akkumulieren sich bei dieser

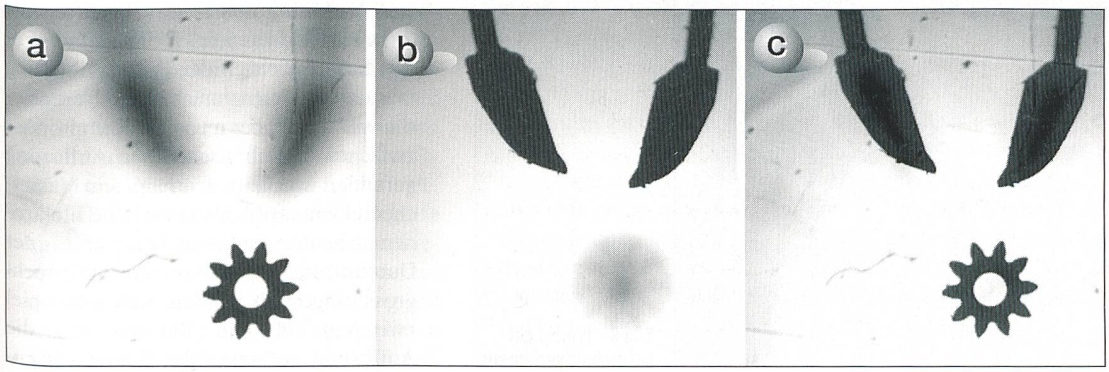



**Bild 5** Multifokussierung: Kombination zweier Bilder mit unterschiedlichen Fokuseinstellungen (links und Mitte) zu einem scharfen Bild (rechts)

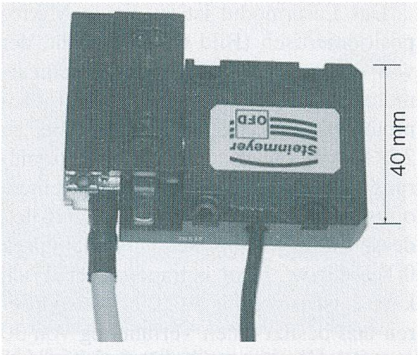



Bild 6 Kompakter Mikropositioniertisch zur Positionierung des Lasers

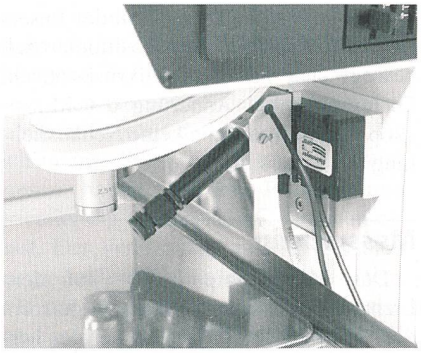


Bild 7 Integration des Lasers in das Mikroskop

Methode mögliche Parameterungenauigkeiten.

Die zweite Methode kommt mit wesentlich weniger Angaben aus. Sie ist ein Spezialfall des allgemeinen Ansatzes, bei dem man sich die Ebenheit des Roboterarbeitsraums (Mikroskoptisch) zu Nutzen macht. Die Schnittlinie mit der Tischplatte dient als Referenzlinie. Ein Objekt im Bereich der Lichtebene bewirkt, wie in Bild 9 zu sehen, einen Versatz der Linie. Dieser Versatz hängt über eine trigonometrische Beziehung direkt mit der Objekthöhe zusammen.

## Kalibrierung

Sowohl das globale als auch das lokale Kamerasystem müssen kalibriert werden. Als Ergebnis erhält man eine Abbildungsfunktion, die den Zusammenhang zwischen Bild- und Weltkoordinatensystem beschreibt. Im Fall der globalen Kamera werden die Kameraparameter mit Hilfe eines gitterförmigen Kalibrierungsmusters (Bild 10) bestimmt.

Zur Kalibrierung des lokalen Sensorsystems wird ein Objektmikrometer verwendet (siehe Bild 11). Eine Kalibrierungsroutine zählt die Linien und setzt ihre Zahl mit der Zahl der Pixel in Relation. Das Ergebnis ist die Pixelgrösse in Weltkoordinaten. Da ein Pixel in der Regel nicht exakt quadratisch ist, wird die Kalibrierung in x- und y-Richtung getrennt durchgeführt.

## Ergebnisse

Das globale Sensorsystem erlaubt die Positionsbestimmung des Roboters mit einer Genauigkeit von 0,5 mm. Diese Genauigkeit ist zur Grobpositionierung völlig ausreichend, beispielsweise zur Navigation des Roboters unter das Mikroskop. Nachdem das Greifwerkzeug unter dem Mikroskop sichtbar ist, wird der Roboter anhand der lokalen Sensorinformationen gesteuert.

Die Genauigkeit der Abstandsmessung hängt von mehreren Faktoren ab, beispielsweise vom Winkel zwischen Lichtebene und optischer Achse des Mikroskops. Sie liegt je nach Mikroskopobjektiv zwischen 0,67 und 5,4 µm. Ein grosser Vorteil der beschriebenen Tiefenmessmethode ist ihre Flexibilität. Auflösung und Messbereich können an die jeweilige Anwendung angepasst werden.

## Sensorsystem bei der Rasterelektronenmikroskopie

Das Rasterelektronenmikroskop ist für Anwendungen der Mikrorobotik sehr attraktiv, da es dem Lichtmikroskop in Auflösung und Schärfentiefe weit überlegen ist. Ausserdem bietet der grosse Arbeitsabstand im REM viel mehr Platz für Robotersysteme. Das Vakuum im REM schaltet die im Mikroskopischen störenden Umwelteinflüsse wie Staub und Luftfeuchtigkeit aus und bietet damit einen weiteren Vorteil. Es schliesst auf der anderen Seite bestimmte Anwendungen wie Klebeprozesse oder Zellmanipulation in der Medizintechnik nahezu aus. Neben der Montage von Mikrosystem-Produkten, die im REM ähnlich wie unter dem Lichtmikroskop abläuft, ist die Qualitäts- und Funktionsprüfung integrierter Schaltkreise ein weiterer Anwendungsbereich für die flexiblen Mikroroboter.

## Integration eines Rasterelektronenmikroskops

Im REM bewegen sich die Mikroroboter auf einer speziell konzipierten, gehärteten und geläppten Stahlplatte. Um sie mit der Steuerung verbinden zu können, sind Kabeldurchführungen durch spezielle Flansche aus der Vakuumkammer heraus notwendig. Die globale Überwachung geschieht wie am Lichtmikroskop über eine CCD-Kamera, die durch ein Bleiglasfenster den Blick in die Probenkammer des REM ermöglicht.

Um das REM-Bild als lokales Sensorsystem verwenden zu können, musste das REM zunächst durch einen PC mit spezieller Einsteckkarte erweitert werden, die es erlaubt, den Elektronenstrahl aktiv vom Rechner aus zu steuern. Der «REM-PC» empfängt Befehle vom Zentralrechner der FMMS bezüglich Bildausschnitt und Auflösung und sendet daraufhin die digitalen Bilddaten des REM zurück. Für den Echtzeitbetrieb der Bildverarbeitung müssen die Aufnahmen schnell eingelesen werden. Dabei muss ein Kompromiss zwischen Signalrauschen und Auflösung gefunden werden; denn um ein ausreichend klares Bild, also eine hohe Elektronenausbeute, zu erreichen, muss der Durchmesser des Elektronenstrahls recht gross eingestellt werden – zum Beispiel zwischen 200 und 500 nm, was die Auflösung auf ungefähr diese Grössen-

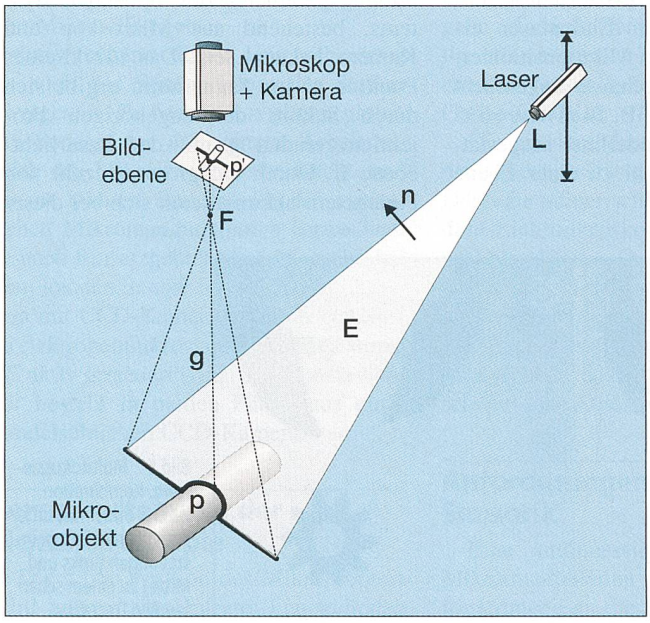



Bild 8 Prinzip des Lichtschnittverfahrens

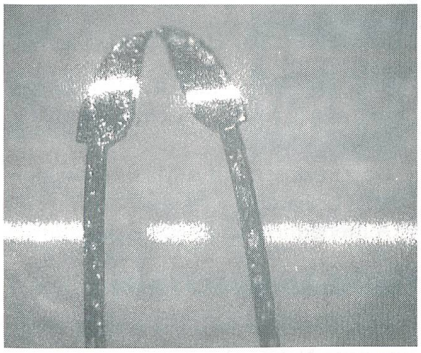


Bild 9 Lichtschnittverfahren zur Abstandsmessung

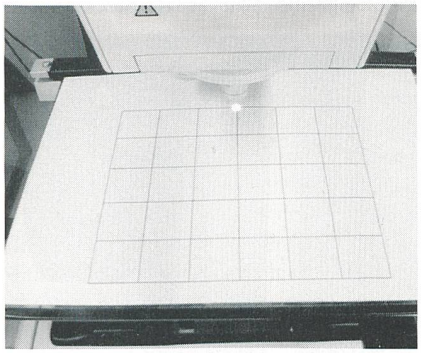


Bild 10 Kalibrierung des globalen Kamerasystems

ordnung schrumpfen lässt. Die digitale Steuerung des Elektronenstrahls ermöglicht es, durch eine Integrationszeit von einigen Mikrosekunden pro Pixel das Rauschen weiter zu mindern. Um trotzdem Bilder in Echtzeit zu erhalten, muss die Bildgrösse entsprechend reduziert werden. Sinnvoll ist daher, die gesamte Szene einmal langsam in einer hohen Auflösung, zum Beispiel mit 4096×4096 Bildpunkten, einzulesen und hierin kleinere «Interessenbereiche» auszuwählen. In diesen Fenstern können dann die Endeffektoren der Roboter und andere relevante Objekte präzise und in Echtzeit beobachtet und verfolgt werden.

## Tiefeninformationen im Rasterelektronenmikroskop

Um auch hier Tiefeninformationen der gesamten Szene zu gewinnen, wird der Blickwinkel «von der Seite» benötigt. Das Installieren einer zweiten Elektronenkanone für ein zweites, laterales REM-Bild ist jedoch sehr teuer und passt daher nicht zum Konzept des preiswerten Mikrorobotersystems. Aus demselben Grund scheidet der Einsatz eines Stereo-REM aus. Viel versprechend ist die Idee, ähnlich der Lasertriangulation mit Hilfe eines Kleinstmikroskops die lumineszierende Linie des Elektronenstrahls aufzunehmen und so beim Rastervorgang ein Oberflächenprofil zu berechnen. Hierzu wird zurzeit mit einem in der Vakuumkammer montierten Kleinstmikroskop experimentiert, das auch ohne Elektronenstrahltriangulation durch die seitliche Perspektive ein Hilfsmittel für die Teleoperation ist. Die zu vermessenden Objekte, primär die Werkzeuge, müssen mit einem Leuchtpulver versehen werden, um eine ausreichend helle Lumineszenzlinie zu erzielen.

## Ausblick

Die Bildsensoren spielen bei Steuerung und Regelung flexibler Mikroroboter eine grosse Rolle, und ihre Entwicklung wird den künftigen Fortschritt in der Mikrorobotik weitgehend bestimmen. Die mikroroboterbasierte, sensorgeführte Montage von Mikrosystemen stellt sich zunehmend als die zurzeit wichtigste Anwendung von Mikrorobotern heraus. Dies ist allerdings ein breit gefächertes Gebiet, und seine Weiterentwicklung ist auf interdisziplinäre Forschungstätigkeit angewiesen. Zahlreiche Probleme, wie CAD-Entwurf von montagefreundlichen Mikrosystemen, Montageplanung und Steuerung in einer FMMS, Echtzeit-Verarbeitung verschiedenartiger Sensordaten, intelligente Regelung von Mikrorobotern oder Kommunikation und Organisation in Mehrrobotersystemen, stehen in der Mikrorobotik noch am Anfang ihrer aktiven Erforschung.

*

Diese Forschungsarbeit wird am Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik (Leitung: Prof. H. Wörn), Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), durchgeführt und von der Europäischen Union (Esprit-Projekt «Miniman», Nr. 33915) unterstützt.

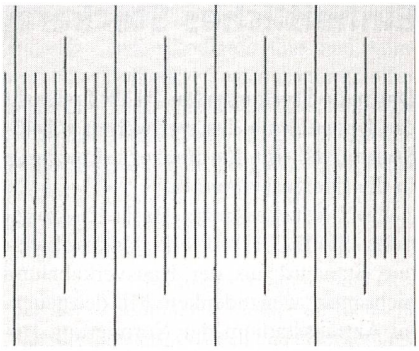


Bild 11 Objektmikrometer (100 Striche/mm) zum Kalibrieren des lokalen Kamerasystems

## Literatur

[1] *S. Fatikow und U. Rembold:* Microsystem Technology and Microrobotics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1997.

[2] *S. Fatikow, J. Seyfried, St. Fahlbusch, A. Buerkle und F. Schmoeckel:* A Flexible Microrobot-Based Microassembly Station. Journal of Intelligent and Robotic Systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 27(2000), 135–169.

[3] *S. Fatikow:* Mikroroboter und Mikromontage. Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner 2000.

[4] *B. Jähne:* Digitale Bildverarbeitung. Heidelberg: Springer 1997.

[5] *P. Haberäcker:* Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. München, Wien: Carl Hanser 1995.

[6] *S. R. Ruocco:* Sensoren und Wandler für Roboter. Weinheim: VCH 1991.

[7] Nanomotion Ltd.: Produktinformation. Israel: http://www.nanomotion.net, 2000.

## Les capteurs d'images en microrobotique

Les microrobots sont le fruit de recherches intensives menées au carrefour de la technologie des microsystèmes et de la robotique. A l'instar des robots traditionnels, les microrobots représentent un système complexe qui regroupe en général différents types d'actionneurs et de capteurs et repose sur des algorithmes pour le traitement des signaux et des informations. Le principal atout des microrobots réside dans leur capacité à effectuer simultanément des manipulations de haute précision avec toutes sortes de petits objets et des mouvements de plus grande ampleur. L'assemblage automatique des microsystèmes est un domaine d'application essentiel.

Le système de capteurs d'images présenté est l'un des composants d'une station de micromanipulation flexible (FMMS) conçue et réalisée à l'université de Karlsruhe. Le pilotage du robot permet d'effectuer des mouvements plus ou moins précis, qui sont détectés par un système de capteurs global (grosse résolution) et local (fine résolution). Le capteur global surveille tout le plan de travail du microrobot, alors que le capteur local observe les micromanipulations. Selon les tâches accomplies, on utilise comme capteur local un microscope optique doté d'une caméra CCD ou un microscope à balayage électronique. Dans tous les cas, une caméra CCD traditionnelle sert de capteur global. Pour l'observation des reliefs, un système de mesure au laser a été intégré au microscope optique.

# Einheitliches Steckersystem für Kupfer und Glasfaser

**Das neue Steckersystem MTRJ erlaubt die Übernahme des weltweiten RJ-45-Standards für Kupferverkabelungen in die Glasfasertechnik.**

LAN-Netzwerke auf Basis RJ-45 gemäss ISO/IEC 11801 sind dank weltweitem Standard aus der Hausverkabelung nicht mehr wegzudenken. Mit der neuen, im Antragsstadium der Normierung stehenden MTRJ-Anschlusstechnik werden die Anschlussdimensionen modularer RJ-45-Steckersysteme in die Glasfasertechnik übernommen. Dies ermöglicht erstmals, unabhängig von Installationszubehör und Befestigungstechnik, gemischte Glasfaser-Kupfer-Netzwerke einschliesslich «Fiber to the Desk» zu realisieren und zu jedem späteren Zeitpunkt den wechselnden Bedürfnissen anzupassen.

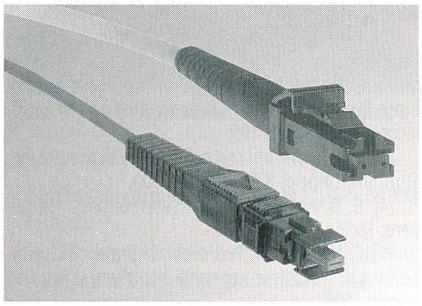


**Bild 1 MTRJ-Stecker für zwei Fasern (oben) und MP-Stecker für zwölf Fasern**

Seit über zehn Jahren werden in Telefonienetzen Bandfaserkabel eingesetzt. Diese damals bahnbrechende Technologie wurde durch NTT in Japan zur Erhöhung der Faserdichte in Kabeln in die Wege geleitet und hat sich mittlerweile in vielen Ländern als Telekom-Standard etabliert. Aus dieser Entwicklungsphase stammt die MP-Steckertechnologie, bei welcher bis zu 12 Fasern (Bandfaser) in einem einzigen Steckerpaar gekoppelt werden.

Die MP-Steckertechnik hat jetzt auch im LAN-Bereich Einzug gehalten. Dies ermöglicht den Einsatz von Multimode-Bandfaserkabeln, die die bisher verwendeten vorkonfektionierten oder auf der Baustelle angeschlossenen Einzelfaserkabel ersetzen. Die MP-Steckertechnik zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- Das MP-Steckersystem verbindet mit minimalen Steckerabmessungen (12 mm×10 mm) 12 Fasern und ermöglicht damit sowohl im Backbone-Bereich als auch im Office-Erschliessungsbereich beträchtliche Platzersparnisse in den Verteilern und in den Kabelkanälen.
- Für den Einzug der Kabel mit montierten Steckern sind auf Grund der kleinen Abmessungen der Stecker und Kabel keine speziellen Bohrungen oder Durchbrüche mehr notwendig.
- Mit dem speziellen Kabeldesign der Bandfaserkabel werden die individuellen Masskonfektionen von Installationslängen durch vorkonfektionierte, lagermässig verfügbare Standardlängen mit MP-Interface-Steckverbindung ersetzt.
- Das Bandfaserkabel ermöglicht es, die Überlängen der standardisierten Längeneinheiten problemlos im Kabelkanal unterzubringen.

In RJ-45-Steckersystemen, welche die international normierten Montageabmessungen respektieren, ist das MTRJ-Faseroptikprogramm ohne Systemanpassungen vollständig integrierbar. Dadurch werden die steckfertigen Komponenten ab Lager verfügbar und können in die Modulverteiler, Verteilpanele und Steckdosen des RJ-45-Systems eingebaut werden. Für die Möglichkeit der Eigenkonfektion der MTRJ-Anschlüsse stehen professionelle Hilfseinrichtungen zur Verfügung. Damit können auch in bestehenden Anlagen jederzeit Nachrüstungen vorgenommen werden.

Mit MTRJ-/MP-Faseroptik-Systemen sind neue Komponenten mit hoher Packungsdichte entstanden. Diese umfassen:

- Konzentratoren/Verteiler in 19"-Technik mit 36 MP-Anschlüssen (432 Fasern) auf 1 Höheneinheit
- Konzentratoren/Verteiler in 19"-Technik mit 144 MTRJ-Anschlüssen (288 Fasern) auf 3 Höheneinheiten
- Wand/Etagenverteiler in Gehäusetechnik, abschliessbar, mit 32 MP-Anschlüssen (384 Fasern)

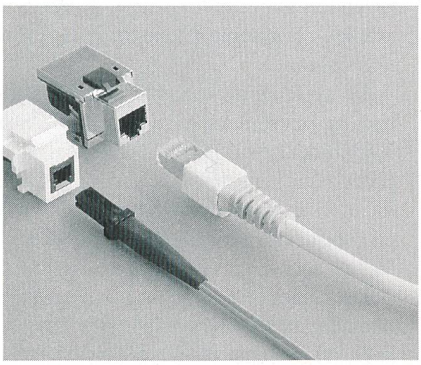


**Bild 2 MTRJ- und RJ-45-Stecker mit Steckdosen**

- Standard-Wand- und Kanalauslassdosen mit 3 MTRJ-Anschlüssen (6 Fasern)
- Desktopdosen mit 6 MTRJ-Anschlüssen (12 Fasern)
- Aufteilermodule 1×MP-Bandfaserstecker auf 12×ST- oder 12×SC-Einzelfaserstecker

Für Planer und Benutzer entsteht damit eine neue Netzwerkgeneration mit bisher nicht erreichter Gestaltungsvielfalt und Platzersparnis. Mit MTRJ-Steckersystemen halbiert sich die Anzahl der notwendigen Steckverbinder an den Endgeräten.

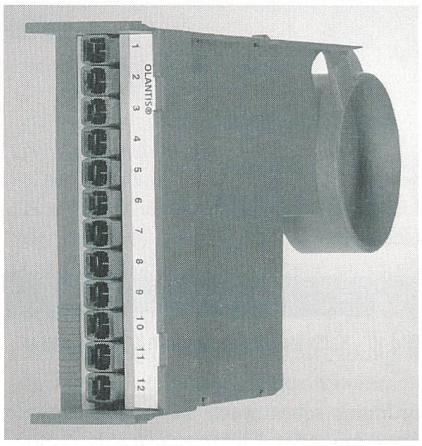



**Bild 3 Verteiler mit 12 MTRJ-Anschlüssen (3 Höheneinheiten)**

Der MP-Bandfaserstecker mit 12 Fasern pro Anschluss ersetzt mit nur 2 Steckern die traditionellen 19"-Verteiler mit 24 Faseranschlüssen pro Höheneinheit. Dadurch wird eine Packungsdichte von 288 Fasern pro Höheneinheit erreicht. Der MP-Bandfaserstecker benötigt somit 12-mal weniger Platz im Etagenverteiler.

Die Zuleitungen zu den Arbeitsplätzen werden vollständig in 12-Faser-Bandfasertechnik ausgeführt, wodurch auch das Stecken in der Etage kostengünstig wird.

Vorgefertigte Endaufteiler ermöglichen bei Bedarf auch weiterhin die Verwendung der traditionellen Steckersysteme vom Typ ST, SC oder anderer gebräuchlicher Steckersysteme.

Zwischen dieser kompakten MTRJ-Faseroptiklösung und einer reinen RJ45-Kupferverkabelung in Kategorie 5e oder Kategorie 6 stehen alle Arten von Mischnetzwerken zur Verfügung, da die Montagedimensionen der MTRJ-Systeme mit denen der modularen RJ45-Jacks dank der internationalen Standardisierung übereinstimmen.

*Fridolin Frech,* Geschäftsführer
Drahtex AG, 8486 Rikon