

Simulation, Wissensmanagement, Digitale Bildverarbeitung und Montagetechnologien – wichtige Werkzeuge für die flexible Produktion von Mikrosystemen

M. Dickerhof, U. Gengenbach, B. Köhler, I. Sieber, IAI

Einleitung

Die zeitnahe und wirtschaftliche Umsetzung mikrosystemtechnischer Entwicklungen in Produkte erfordert besonders bei kleinen und mittleren Stückzahlen flexible Werkzeuge auf allen Ebenen der Produktentwicklung und Fertigung.

Bereits im frühen Stadium der Produktentwicklung können rechnerunterstützte Entwurfs- und Simulationswerkzeuge sehr effizient eingesetzt werden. So können schon bei der Modellierung von Mikrosystemen leistungsmindernde Einflüsse wie z.B. Systemtoleranzen berücksichtigt werden. Dem Systementwickler wird somit bereits im Planungsstadium die Simulation der Leistungsmerkmale des Systems in Abhängigkeit von Störeinflüssen und eine anschließende Optimierung der Systemparameter ermöglicht.

Zur Erfassung und Strukturierung der während des Entwicklungs- und Fertigungsprozesses anfallenden Informationen und zur Bereitstellung von interdisziplinärem Wissen auf allen Ebenen dienen Workflow- und Wissensdatenbanken. In der Planung und Fertigung komplexer Mikrosysteme können diese Werkzeuge wesentlich zur Prozesssicherheit beitragen.

Während Prozesse zur Fertigung von Mikrokomponenten weitgehend etabliert sind existieren in der Montage komplexer modularer Mikrosysteme noch Lücken. Handlungsbedarf besteht u.a. im Aufbau von flexiblen Greif- und Zuführsystemen für die Mikro-montage.

Digitale Bildverarbeitung ist ein Standardwerkzeug in der konventionellen industriellen Fertigung. Dafür stehen am Markt leistungsfähige Hard- und Softwaresysteme zur Verfügung. Auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik sind aber speziell angepasste Bild-erfassungs- und Auswertesysteme erforderlich.

Diese komplette Werkzeugpalette sowie ihre Anwendung in verschiedenen Forschungs- und Industrieprojekten werden in diesem Beitrag vorgestellt.

Entwurfs- und Simulationswerkzeuge

Der Entwurf von Mikrosystemen ist trotz großer Fortschritte in den letzten Jahren geprägt durch Intuition und Erfahrung der Designer sowie gekennzeichnet durch langwierige und kostenintensive Experimente mit Testaufbauten. Dieser Aufwand muss durch verstärkten, entwurfsbegleitenden Rechnereinsatz drastisch reduziert werden [1]. Simulation und Modellbildung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen sind notwendige Etappen im Entwicklungsprozess hinsichtlich der Erzielung eines optimalen Systemverhaltens, kurzer Entwicklungszeiten und der Vermeidung und Eliminierung von Fehlern bereits im frühen Entwicklungsstadium. Die Aktivitäten des Forschungszentrums im Bereich Modellbildung, Simulation und Optimierung erstrecken sich sowohl auf den Einsatz kommerzieller Entwurfs- und Simulationswerkzeuge als auch auf die Entwicklung anwendungsspezifischer Simulationssoftware.

Ein Konstruktionsaspekt ist die Gewährleistung einer bestimmten Funktionalität des Gesamtsystems, welche eng mit der Strukturgeometrie und den Einsatzbedingungen verknüpft ist. Damit die Gesamtfunktion des Mikrosystems unter den gegebenen Fertigungsbedingungen und in den zu erwartenden Einsatzumgebungen bestmöglichst erhalten bleibt, muss der Systementwurf auf Wechselwirkungen überprüft und abgestimmt werden. Der Simulation der Mikrosysteme in Abhängigkeit leistungsmindernder Einflüsse kommt somit eine zentrale Bedeutung zu. Im Hinblick auf eine Massenfertigung beschreibt nicht notwendig die ideale Anordnung der Einzelkomponenten auch das effektivste System. Vielmehr müssen hier schon bei der Modellbildung leistungsmindernde Einflüsse, wie z.B. Einfügetoleranzen oder umgebungsinduzierte Einflüsse wie z.B. Temperaturänderungen berücksichtigt werden, damit der Entwurf mit dem Ziel einen robusten, stabilen Funktionsaufbau zu erreichen optimiert werden kann. Unter dem Begriff robust ist in diesem Zusammenhang ein System zu verstehen, das unter realen Einsatzbedingungen durch definierte Leistungsmerkmale charakterisiert ist. Die Berücksichtigung von Herstellungs- und Fertigungstoleranzen sowie von umgebungsinduzierten Einflüssen bereits im Stadium der Modellbildung erlaubt die Simulation des Entwurfs unter realen Einsatzbedingungen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Designoptimierung mit dem Ziel eines robusten Systementwurfs.

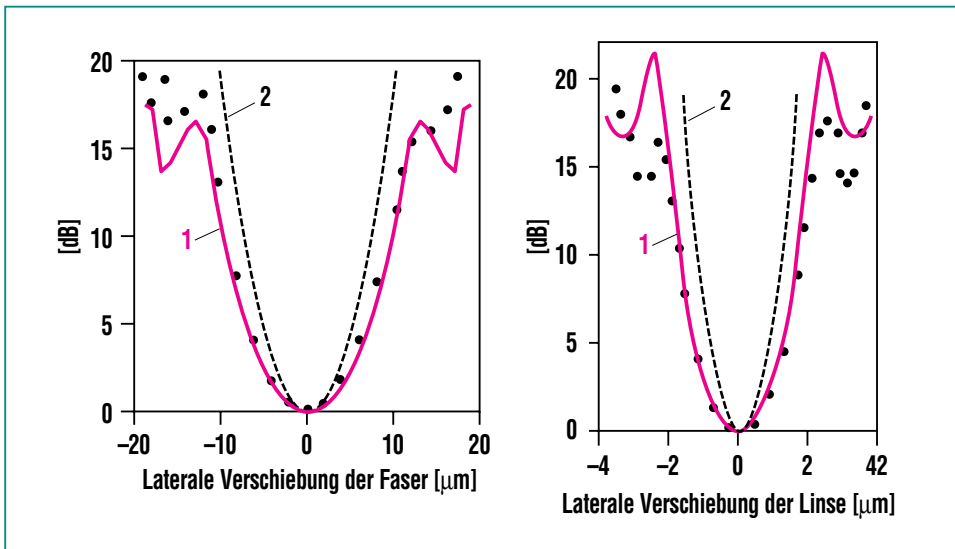


Abb. 1: Koppeldämpfung verursacht durch eine Verschiebung der Faser (links) bzw. der Kugellinse (rechts). Die schwarzen Punkte markieren die Messergebnisse [2], die rote Linie stellt die von der Simulation vorausgesagte Koppeldämpfung dar.

Die Auswirkungen von Positionstoleranzen auf die Leistungsfähigkeit eines optischen Systems wird am Beispiel eines Laser-Faser-Kopplers deutlich. Bei diesem mikrooptischen System modifiziert eine Linse (hier eine Kugellinse) die Laserabstrahlung so, dass eine möglichst effektive Einkopplung des Laserstrahls in

eine Faser gelingt. Anhand dieses Versuchsaufbaus kann die Einkoppeldämpfung in Abhängigkeit der Positionierung von Kugellinse und Single-Mode-Faser gemessen und mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Der Vergleich zwischen Messergebnissen und Simulationsergebnissen ist in Abb. 1 dargestellt. Diese Untersuchungen berücksichtigen nur den Koppelverlust, der durch die Lateralverschiebung auftritt. Die von der Simulation berechneten Ergebnisse (rote Linien) stimmen sehr gut mit den Messwerten überein (schwarze Punkte). Mit Hilfe solcher Simulationsergebnisse kann im Vorfeld der Entwurfsplanung bereits das mikrooptische System charakterisiert werden, indem die Abhängigkeit der Leistungsmerkmale des Systems von den Positionstoleranzen der einzelnen optischen Komponenten bestimmt wird. Ausgehend von einer be-

stimmten Fertigungstechnologie der Halte- und Positionsstrukturen und der damit verbundenen Toleranzen kann nun die Leistungsfähigkeit des optischen Systems bestimmt werden. Andererseits kann aus der Vorgabe der Leistungsfähigkeit des optischen Systems auf die maximal zulässigen Positionstoleranzen der einzelnen Komponenten geschlossen werden. Mit diesem Ergebnis kann nun die Fertigungstechnologie gesucht werden, die die erwünschte Güte garantiert.

Die Relevanz der Berücksichtigung von Systemtoleranzen wird auch am Beispiel des Infrarot-Gassensors (s. Abb. 2) deutlich [3]. Hierbei handelt es sich um eine Anwendung aus dem BMBF-Verbundprojekt OMID (Optimierung von Mikrosystemen für Diagnose- und Überwachungsanwendungen). Als Quelle dient ein breitbandig abstrahlendes Glühlämpchen, dessen Strahlung von einem Reflektor fokussiert wird. Die Analyse kammer besteht im wesentlichen aus zwei gegenüberliegenden fokussierenden Spiegeln, von denen der eine paraboloidisch und der andere sphärisch strukturiert ist. Messungen der Bestrahlungsstärkeverteilung am Detektorabgang ergaben für unterschiedliche Glühlämpchen als Quelle stark unterschiedliche Ergebnisse (siehe Abb. 3). Untersuchungen der Quellen ergaben, dass die Wendepositionen stark variieren. Diese Abweichungen spielen sich im Bereich von $\pm 0,5\text{mm}$ ab. Da es sich bei dem vorgestellten Sensorsystem um eine Anwendung im Niedrigpreissegment handelt, möchte der Hersteller an der tole-

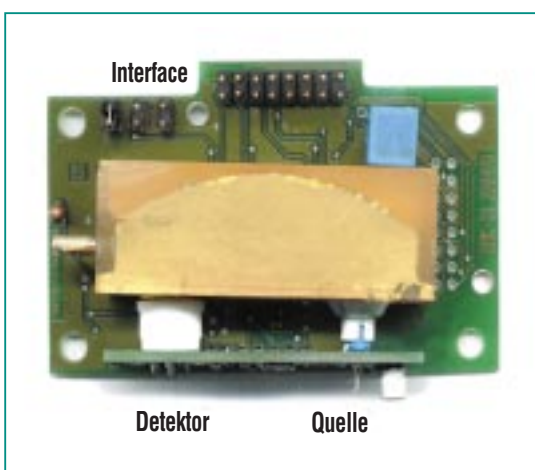


Abb. 2: Infrarot-Gassensor mit Controller-Interface.

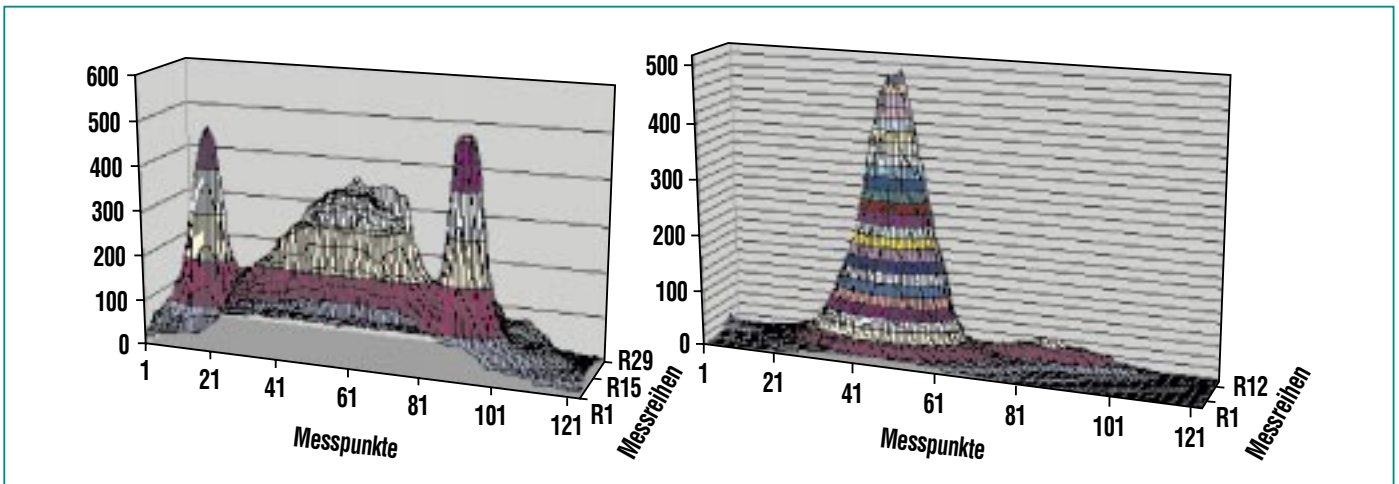


Abb. 3: Bestrahlungstärke-Verteilungen am Detektorabgang für zwei verschiedene Glühlämpchen derselben Herstellungserie.

ranzbehafteten Quelle festhalten, und es ist auch zu aufwendig, jedes einzelne Teil mit einer Leistungsmessung zu justieren.

Die Fragestellung für das Re-Design der Analyse kammer ist nun das Auffinden eines hinsichtlich der Positionstoleranz der Quelle robusten Entwurfs. Dazu wurden Strahlverfolgungsuntersuchungen durchgeführt. Für den Entwurf des Sensors als Einzelgasdetektor ist nur die Strahlung rele-

vant, die auf das Detektorelement trifft. Im Falle des ursprünglichen Designs liegt die Ausbeute der Strahlen, die tatsächlich das Detektorelement treffen, lediglich bei ca. 2,7%. Ein Re-Design der Analyse kammer unter Berücksichtigung der relevanten Parameter wie Strahlweg in der Kammer und Strahlverlauf ermöglicht für das ideale, toleranzfreie System eine Ausbeute von 65%. Ausgehend von diesem Re-Design wird nun der Entwurf gesucht, der über

den gesamten Toleranzbereich die besten Leistungsmerkmale bietet. Die Verteilung der Strahlauftreffpunkte auf dem Detektor für das optimierte Design sind für drei Quellpositionen im Toleranzbereich in Abb. 4 dargestellt. Der Strahlanteil, der auf die Detektorfläche trifft, liegt im Falle des modifizierten Entwurfs mindestens bei 12,2%. Dieser Wert wurde für die Wendelposition gefunden, die + 0,5 mm von der optimalen Position liegt (Abb. 4 rechts). Bei einer

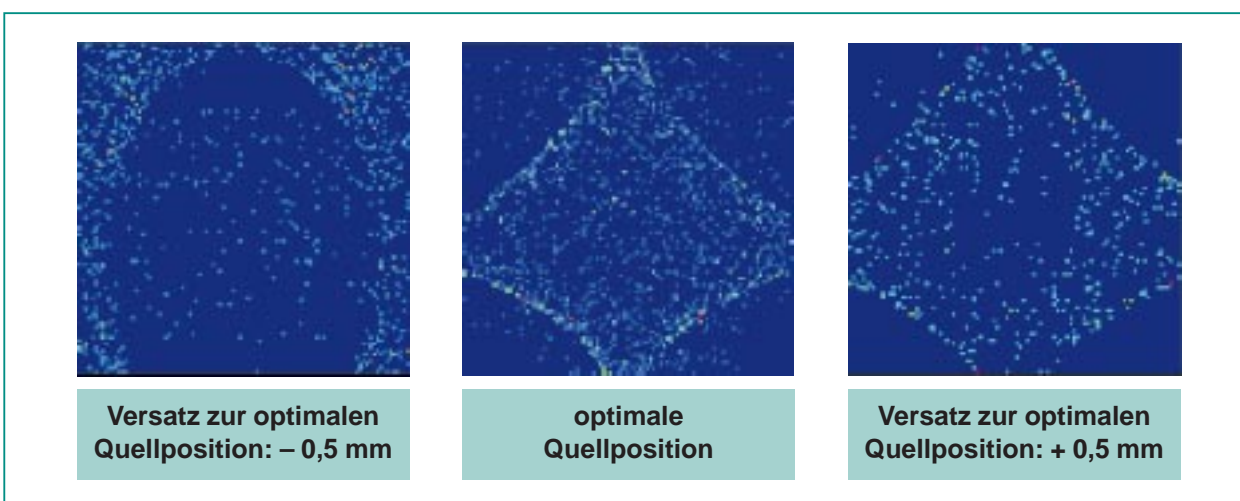


Abb. 4: Strahlauftreffpunkte am Detektor für eine Toleranzbereich von ± 0.5 mm.

Wendelposition, die $-0,5$ mm von der optimalen Position liegt, erhält man eine Strahlausbeute von ca. 18,3%. Für die optimale Position ist die Strahlausbeute 31,4%, und entspricht somit ungefähr der Hälfte des Wertes, der vom idealen Design erreicht würde. Diese verminderte Leistung muss akzeptiert werden, wenn man einen Entwurf möchte, der über diesen gesamten Toleranzbereich robust ist. Gegenüber dem ursprünglichen Entwurf konnte mit dem Re-Design eine Verbesserung der Strahlauftreffquote um den Faktor 4,7 erreicht werden.

Workflow- und Wissensdatenbanken

Die hohe Fertigungskomplexität mikrosystemtechnischer Prozesse erfordert entlang des Produktentstehungsprozesses ein hohes Maß an Wissen über die fertigungsschrittübergreifenden Zusammenhänge. Spezielle, auf die Anforderungen der Produktion angepasste, prozess- oder fertigungsorientierte Workflow- und Wissensmanagementsysteme bieten dem Mitarbeiter in Entwicklung und Produktion die Möglichkeit, prozessrelevante Informationen zu erfassen und auf bisherige Erkenntnisse zugreifen zu können.

Auftrags- und Prozessdatenerfassung mit AdHoc-Workflowsystemen

Workflowsysteme werden heute immer noch vor allem für starr strukturierte Abläufe, wie sie zum Beispiel in der Verwaltung vorkommen, eingesetzt. Entwicklungsprozesse – insbesondere in

der Mikrosystemtechnik – weisen einen wesentlich geringeren Grad an Standardisierung auf. Hier hat man es in der Regel mit Kleinserien- oder Einzelfertigungsprozessen zu tun, für die sich der Aufwand einer kompletten Standardisierung nicht lohnt, bzw. aufgrund der noch nicht vollständigen Kenntnis der konkreten Prozessparameter und ihrer Abhängigkeiten, nicht möglich ist.

Eine Möglichkeit, solche Abläufe dennoch zu unterstützen stellen sog. „AdHoc“ Workflowmechanismen dar, welche die einfache Planung von Abläufen, die Behandlung von Ausnahmen und Abbrüchen, das Einfügen von neuen Prozessschritten zur Laufzeit, etc. unterstützen. Zusammen mit dem IMT wurde hieraus aufbauend für die dortige Mikrofertigung das Softwaresystem InfoFlow entwickelt [4], das der Klasse der Projektverfolgungssysteme zugeordnet werden kann. Kommerzielle Softwaresysteme in diesem Bereich orientieren sich primär an der Planung, Verfolgung und Dokumentation von Abläufen, die auf standardisierten Prozessen beruhen. InfoFlow unterstützt ebenfalls diese Funktionen, orientiert sich aber primär an den Anforderungen der Entwicklung oder Vorseerienfertigung. Die Mitarbeiter in der Planung und der Fertigung werden durch eine flexible, einfache und fertigungstypbezogene Definition von Prozessen, sowie eine umfassende automatisierte Dokumentation und Strukturierung der Informationen unterstützt. Entscheidungen der Prozessverantwortlichen, wie sie bei Defekten, oder Abweichungen von den Vorgaben notwendig

sind, werden durch kontextabhängige Funktionen unterstützt. Entlang der Fertigung erfolgt dabei zusätzlich die Erfassung der Messdaten, die dabei zur Verbesserung der Wiederverwendbarkeit in auftrags-, prozess- und prozessschrittspezifische Parameter aufgetrennt werden.

Sind die Roh-Informationen in der voranstehend beschriebenen Art und Weise vorstrukturiert ist eine weitgehend projektunabhängige Analyse der Messdaten möglich, was neben der schon erwähnten Fertigungsdokumentation Rückschlüsse auf die Qualität der Vorgaben oder auch auf die Qualität der Fertigungsschritte (z.B. Maschinendrift) zulässt.

Strukturierung von Prozesswissen

Im Rahmen eines Unterauftrags für das vom BMBF geförderte Projekt „Kompetenzzentrum Trockenbearbeitung“ wurden der Infoflow-Ansatz zur auftrags- und prozessunabhängigen Erfassung von Parametern weiter verfeinert. Gegenstand des Projekts ist es unter anderem, eine Wissensdatenbank für Zerspanungsverfahren zur Verfügung zu stellen [5]. Experten, die verteilt in unterschiedlichsten Kompetenzzentren an den verschiedenen Bearbeitungsschritten arbeiten, können so ihr Wissen zentral ablegen.

Die zugrundeliegende Methode kann dabei folgendermaßen beschrieben werden: Bei einem Entwicklungs- und Fertigungsprozess wird der Gesamtprozess im Vorfeld in einzelne Prozessschritte aufgelöst, so dass die Abfolge bzw. Kombination der Einzelpro-

zessschritte den Entwicklungsauftrag genau charakterisiert (Workflow). Dennoch sind die Prozessschritte gerade bei komplexen Prozessen in diesem Zustand oft noch so prozess- und auftragspezifisch, dass der Prozessschritt nicht ohne weiteres in andere Prozessketten eingebettet werden kann.

Um diese Prozessabhängigkeit zu überwinden, wird der Prozessschritt selbst weiter untersucht. So stellt sich im konkreten Fall eine starke auftragspezifische Abhängigkeit vom Werkstoff heraus. Der Implementierungsansatz basiert daher auf der Erfassung eines bestimmten Prozessschritts unter mehreren Aspekten, im konkreten Fall der Erfassung der Fertigungsverfahren und der Werkstoffe. Allerdings ergibt sich bei einer hinreichend großen Zahl von Fertigungsverfahren und Werkstoffen eine sehr große Anzahl möglicher Kombinationen, so dass die Möglichkeiten der Wiederverwendbarkeit nicht sehr hoch sind. Dieses Problem wurde durch sogenannte Generalisierungshierarchien gelöst, die eine Zusammenfassung von Technologien und den damit verknüpften Eigenschaften erlauben. So werden beispielsweise die Verfahren *Stirn-Planfräsen*, *Stirn-Umfangs-Planfräsen* und *Umfangs-Planfräsen* auf der nächst höheren Generalisierungsebene zu *Planfräsen* zusammengefasst, das dann auf der nächst höheren Ebene, zusammen mit *Profil-*, *Wälz-* und *Schraubfräsen*, zu *Fräsen* abstrahiert wird. Die höchste Abstraktionsebene stellt die Wurzel des Baumes dar, die alle Verfahren zusammenfasst.

Innerhalb des Generalisierungsbaums wird auf dem „umgekehrten Weg“ den einzelnen Knoten (Verfahren) eine beliebige Anzahl von Attributen zugeordnet (z.B. Durchmesser, Vorschub), die sich innerhalb des Hierarchiebaums vererben. So besitzt dann ein konkretes Verfahren alle Attribute, die ausgehend vom konkreten Verfahren über alle Generalisierungsstufen bis zur Wurzel hinweg zugeordnet werden. Innerhalb einer Projektanfrage werden den Attributen der verschiedenen Prozesse im Rahmen der Materialbearbeitung auf der untersten Ebene (Blätter) konkrete Werte zugeordnet (z.B. Durchmesser: 12 mm, oder der Vorschub beim Fräsen: 22 mm/sec). Die Kombination von Blättern mehrerer Generalisierungsbäumen, zusammen mit den zugeordneten Attributen, ergibt dann „automatisch“, d.h. ohne Pflegeaufwand für den konkreten Prozess das Prozessdatenblatt zur Erfassung der Prozessparameter, das abhängig von Verfahren bzw. Werkstoffen unterschiedliche Attribute (Datenfelder) aufweist. Aufgrund der damit strukturiert vorliegenden Messwerte lässt sich analysieren, wo und wie stark die Abhängigkeit der Verfahren von den eingesetzten Werkstoffen ist und daraus Gestaltungsregeln (Design Rules) ableiten die für die Entwicklungsplanung notwendig sind.

Das weiterführende Ziel der Arbeiten auf diesem Gebiet ist die Erweiterung des Ansatzes auf die speziell in der Mikrosystemtechnik äußerst wichtigen prozessschrittübergreifenden Aspekte.

Mikromontage

Ein Großteil der am Markt verfügbaren Mikrosysteme wird aus Silizium mit Prozessen der Halbleitertechnik produziert. Dies gilt insbesondere für Beschleunigungs- und Drehratensensoren, die in großen Stückzahlen in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Die Stärke der Nicht-Siliziumtechniken, wie Laserstrukturierung, mechanische Mikrofertigung, Abformtechniken und LIGA liegt in der Materialvielfalt, die zum Aufbau von Mikrosystemen zur Verfügung steht. Dieser Vorteil wird zunehmend in der Bioanalytik und optischen Telekommunikation genutzt. Der „Preis“ für diese Materialvielfalt und die damit einhergehende Flexibilität beim Design ist die Abkehr vom monolithischen Aufbau; es entsteht nun ein erheblicher Aufwand für die Montage der Mikrosysteme.

Modulares Mikromontagesystem

Da viele dieser hybriden Mikrosysteme immer noch nur in kleineren und mittleren Stückzahlen produziert werden, ist von den Fertigungsgeräten große Flexibilität und leichte Umrüstbarkeit gefordert. Unter diesem Gesichtspunkt entwickelte das IAI zusammen mit Fa. IEF-Werner ein Konzept für eine modulare Montagemaschine und realisierte dieses Konzept für die Montage von mikrofluidischen Analysesystemen. Wesentliche Entwicklungs Gesichtspunkte waren dabei:

- der Einsatz von neuentwickelten direktangetriebenen Linearachssystemen des Partners IEF-Werner,

- der Einsatz von Zuführsystemen, die mit dem Werkstückträgerstandard DIN 32561 kompatibel sind,
- der Einsatz von mehreren preiswerten z-Linearachssystemen anstatt eines aufwendigen und fehleranfälligen automatischen Werkzeugwechselsystems und
- ein modularer Aufbau der Steuerungssoftware.

Für die Montage mikrofluidischer Analysesysteme eines Industriepartners wurde eine Montagemaschine nach diesem Konzept realisiert (s. Abb. 5). Diese Maschine muss drei unterschiedliche Mon-

tageaufgaben durchführen und muss daher hinsichtlich Teilebereitstellung und Montagewerkzeugen flexibel umrüstbar sein. Da die zu montierenden Teile auf maximal drei Werkstückträgern zugeführt und maximal vier Werkzeuge benötigt werden, wurde eine Maschine mit folgenden technischen Daten aufgebaut:

- eine x-Achse mit 600 mm Weg, darauf eine Vakuumspannvorrichtung für drei Werkstückträger nach DIN 32561,
- eine y-Achse mit 450 mm Weg, darauf montiert
- vier z-Achsen mit je 35 mm Weg und 3N Traglast

Jede z-Achse wurde zur Erleichterung des Umrüstens mit einer Werkzeugwechselschnittstelle für manuellen Wechsel ausgerüstet. Die grafische Bedienoberfläche der Maschine wurde in LabView programmiert. Sie kommuniziert mit der Maschinensteuerung und erlaubt es, Achsen zu verfahren, Greifwerkzeuge zu betätigen, Positionen zu teachen und Montageprogramme auszuwählen und ablaufen zu lassen. Aufbauend auf diesem modularen Konzept, ist die Entwicklung einer Montagemaschine für eine mikrooptische Komponente in einem gemeinsamen BMBF-Verbundprojekt mit dem IMT geplant.

Greiferbaukasten für die Mikromontage

Die Flexibilität einer Montagemaschine hängt u.a. auch von der Flexibilität der Teilezuführung und der Greifwerkzeuge ab. Während auf dem Gebiet der Teilezuführung ein Standard für die Gestaltung von Werkstückträgern für die Mikrosystemtechnik geschaffen wurde (DIN 32561), besteht auf dem Gebiet der Montagewerkzeuge noch Handlungsbedarf. Daher erarbeitet das IAI zusammen mit vier Industriepartnern und einem weiteren Forschungsinstitut Grundlagen und erste Prototypen von modularen Greifsystemen im BMBF-Verbundprojekt „Greiferbaukasten“.

Ziel ist es, Greifersysteme für die Mikromontage systematisch in eigenständige Funktionselemente zu untergliedern und daraus Module mit standardisierten Schnittstellen zu definieren. Zur Lösung einer bestimmten Greifaufgabe soll der dafür passende Greifer



Abb. 5: Realisierte Maschine zur Montage von mikrofluidischen Analysesystemen.

aus Modulen des Baukastens zusammengesetzt werden. Die Definition dieses Modulschemas ist abgeschlossen; derzeit werden Schnittstellen spezifiziert und erste Module gebaut.

Das IAI entwickelt im Rahmen des Projektes sowohl einen modularen Mikrogreifer als auch in Mikrogreifsysteme integrierbare Bilderfassungsmodule. Neben diesen eigenständigen Entwicklungsarbeiten besteht eine enge Zusammenarbeit mit der Fa. Schunk zur Entwicklung einer automatischen Greiferwechselschnittstelle und mit der Fa. Piezosysteme Jena zur Realisierung einer Feinpositioniereinheit.

Eine automatische Greiferwechselschnittstelle ist für Montagesysteme, die während eines Montageprozesses Werkzeuge wechseln müssen, von großer Bedeutung. Der Projektpartner Fa. Schunk bedient den Markt der makroskopischen Montageroboter mit automatischen Werkzeugwechselsystemen mit Flanschdurchmessern bis herunter zu 50 mm. Aus einer Umfrage ergaben sich für die Mikromontage Bedarf an Wechselsystemen bis herunter zu 10 mm Flanschdurchmesser. Daher wird im Verbundprojekt eine Wechselschnittstelle mit den Flanschdurchmessern 30 mm, 20 mm und 10 mm entwickelt. Da vielfach die Anforderung besteht den Montageprozess durch die Werkzeugachse per Kamera zu beobachten, sind diese Schnittstellen mit einer Mitlenbohrung ausgestattet. Je nach Ausführung stellen diese Schnittstellen bis zu 12 elektrische bzw.

fluidische Verbindungen zur Verfügung.

Die Flexibilität des eigentlichen Greifsystems hängt im Falle von Sauggreifern und mechanischen Greifern wesentlich von der einfachen Austauschbarkeit des eigentlichen Greiforgans, des sogenannten Wirksystems, ab. Bei makroskopischen Greifern können oft die Backen einzeln manuell gewechselt werden, während bei Greifern für die Mikromontage diese Schnittstelle bisher wenig beachtet wird. In vielen Fällen werden Mikrogreifer sogar monolithisch ausgeführt, so dass bei einer Änderung der Greifaufgabe das komplette Greifsystem auszutauschen ist. Der am IAI entwickelte Mikrogreifer (s. Abb. 6) trennt Greifeinheit und Aktoreinheit [6]. Die Greifeinheit ist als monolithisches Kunststoffteil mit Festkörpergelenken ausgeführt, das mit Abformverfahren preiswert hergestellt werden kann. Über eine automatisch zu betätigende Clipverbindung wird die Greifeinheit mit der Aktoreinheit verbunden. Die Aktoreinheit besteht aus einem Piezostapelaktor, dessen maximale Dehnung von 15 μm über ein Übersetzungsgetriebe auf 300 μm vergrößert wird. Die resultierende Bewegung wird über einen Stift auf die Greifeinheit übertragen und führt zu einem Greifweg von 1 mm zwischen den Backen. Beim Prototyp in Abb. 6 ist die Greifeinheit noch mit Passstiften und einer Schraube fixiert. Der automatisch zu betätigende Clipmechanismus befindet sich noch in der Entwicklung.

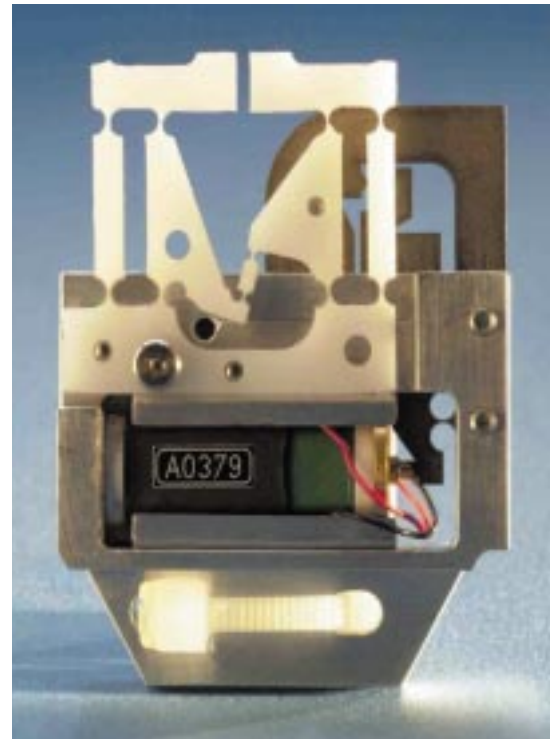


Abb. 6: Mikrogreifer mit monolithischer, wechselbarer Greifeinheit.

Digitale Bildverarbeitung

Für den Einsatz digitaler Bildverarbeitungstechniken bei Mikrostrukturen wird am IAI das Bildverarbeitungssystem DIPLOM (Digital Image Processing Library for Microstructures) entwickelt [7] [8]. Die DIPLOM-Software ist in C++ implementiert und kann als Bibliothek in Anwenderprogrammen integriert werden. Durch den Einsatz des DIPLOM-Systems können Mikromontage-, Prüf- und Vermessungsvorgänge an Mikrostrukturen automatisiert werden.

Neben Standardfunktionen (Muster suchen, Markenzentren berechnen, etc) enthält das DIPLOM-System besondere Funktionen zur Lösung von Problemen beim Einsatz digitaler Bildverar-

beitungstechniken an Mikrobauteilen. Die dafür speziell implementierten Funktionen Autofokus, Kontrastoptimierung, Bildrekonstruktion aus Fokuserien und Bildrekonstruktion aus Beleuchtungsreihen sollen in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

Autofokus

Physikalisch bedingt reduziert sich die Schärfentiefe bei optischen Systemen mit zunehmender Vergrößerung. Zur Erzeugung hochauflöster Bilder ist deshalb bei Mikroskopaufnahmen eine exakte Fokuseinstellung erforderlich. Zur rechnergesteuerten automatischen Fokussierung wurde im DIPLOM-System eine Autofokusfunktion mit digitaler Bildverarbeitung implementiert. Die Funktion berechnet in Echtzeit (40 ms) einen relativen Schärfewert für das aktuelle Bild; dieser berechnete Schärfewert wird bei optimaler Fokussierung maximal (s. Abb. 7). Basierend

auf diesen errechneten Schärfewert kann der Fokusantrieb automatisch geregelt werden.

Durch Auswahl eines Bildausschnittes kann die Fokussierung nur auf eine Detail ausgerichtet werden; die übrigen Bildbereiche werden dann bei der Berechnung des Schärfewertes und somit bei der Fokussierung nicht berücksichtigt. Mit der Autofokusfunktion des DIPLOM-Systems ist es auch möglich, gezielt auf eine Ebene unterhalb einer transparenten Deckschicht zu fokussieren.

Kontrastoptimierung

Damit bei hohen Vergrößerungen und schwach reflektierenden Oberflächen noch ausreichend Kontrast erzielt werden kann, sind Lichtmikroskope mit leistungsfähigen Beleuchtungssystemen ausgestattet. Ist die verfügbare Beleuchtungseinrichtung für eine kontrastreiche Aufnahme nicht ausreichend, so kann mit der

Kontrastoptimierungsfunktion des DIPLOM-Systems der Bildkontrast erheblich gesteigert werden (s. Abb. 8).

Durch eine reine Histogrammdehnung (Standardfunktion in den meisten Bildbearbeitungsprogrammen) werden die Strukturen für das menschliche Auge besser erkennbar (s. Abb. 8b). Es wird dadurch aber auch das vorhandene Rauschen mit verstärkt. Der Informationsgehalt in den Bildern 8a und 8b ist identisch; in Abb. 8b werden einige Strukturen lediglich für das menschliche Auge erkennbar. Mehr Informationsgehalt kann erreicht werden, wenn durch Mittelwertbildung aus mehreren kontrastarmen Einzelaufnahmen ein neues Bild berechnet wird. Dadurch erhält man ein wesentlich kontrastreicheres Bild (s. Abb. 8c) bei dem deutlich mehr Konturdetails erkennbar sind als bei der alleinigen Histogrammdehnung in Abb. 8b.

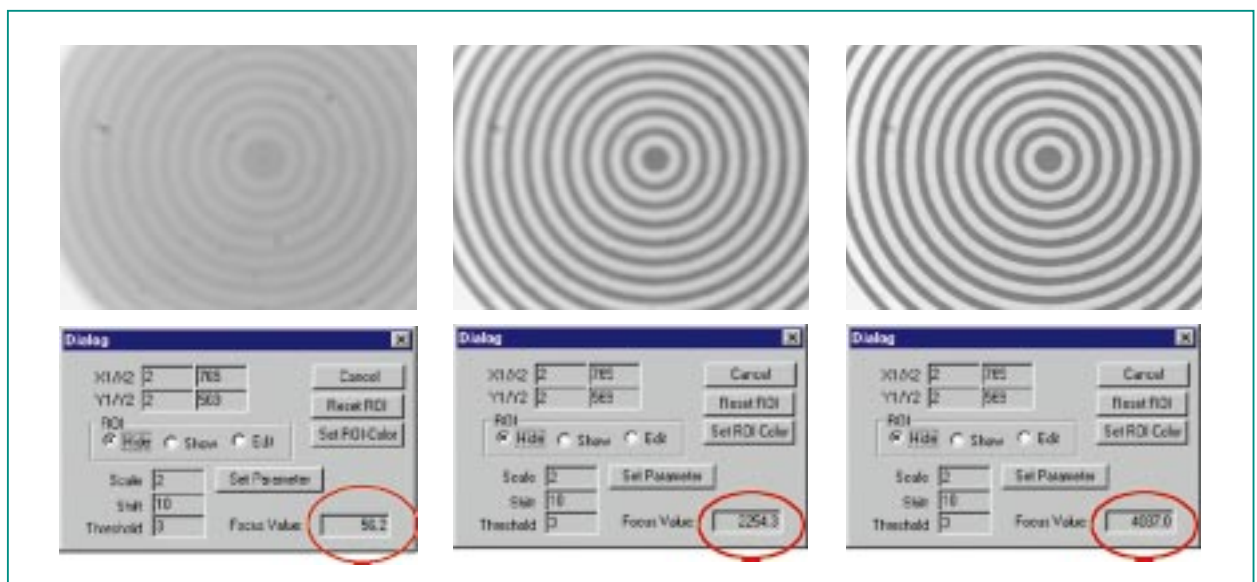


Abb. 7: Fokuswertberechnung für drei unterschiedliche Fokusstellungen.

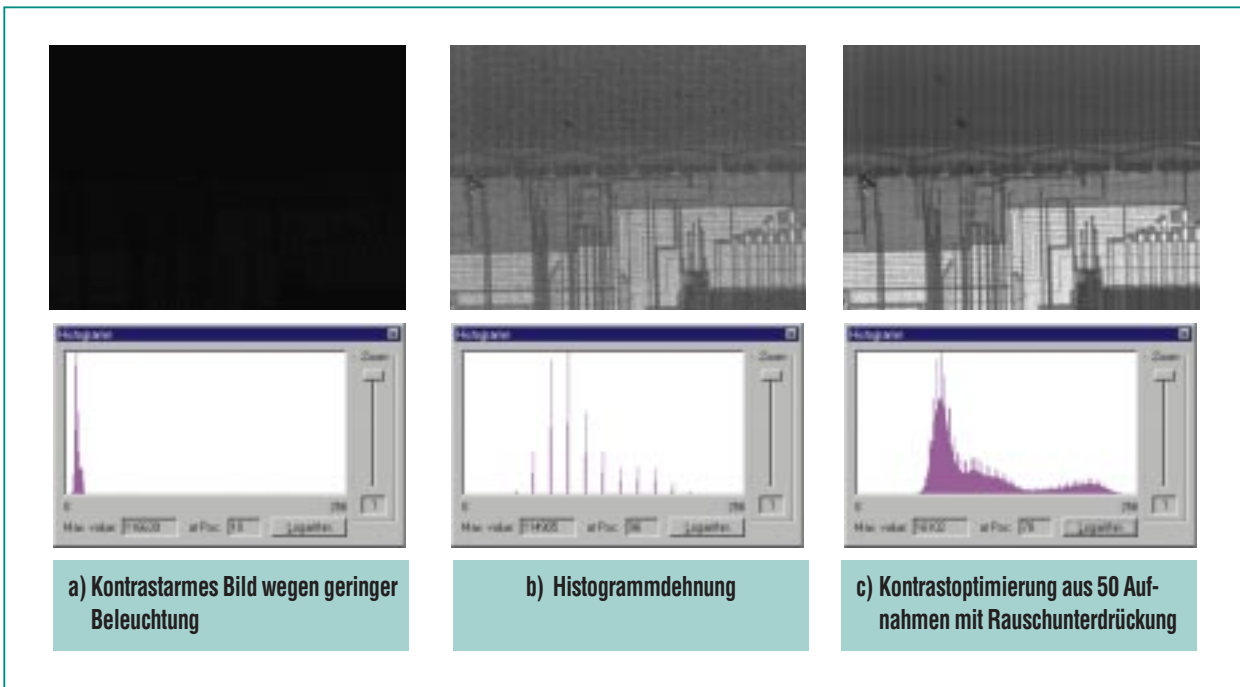


Abb. 8: Beispiel für eine Kontrastoptimierung mit dem DIPLOM-Bildverarbeitungssystem; unter den Bildern ist die zugehörige Grauwertverteilung (Histogramm) grafisch dargestellt.

Bildrekonstruktion aus Fokusserien

Ist die Höhenstruktur eines zu untersuchenden Bauteils höher als die Schärfentiefe, so kann das Objekt nicht mehr in einer Fokussierung als Einzelbild komplett erfasst werden. Abhängig von der Fokussierung sind jeweils unterschiedliche Objektbereiche fokussiert. Damit Bauteile, deren Höhenstruktur größer ist als die Schärfentiefe, auch mit Lichtmikroskopen komplett dargestellt werden können, wurde ein geeignetes Verfahren zur Bildrekonstruktion aus Fokusserien entwickelt (s. Abb. 9).

Grundlage für die Bildrekonstruktion ist die Aufnahme einer Fokusserie. Der zu analysierende Fokussierbereich ist abhängig von der Strukturhöhe. Die Serie wird gestartet mit einer Fokussierung

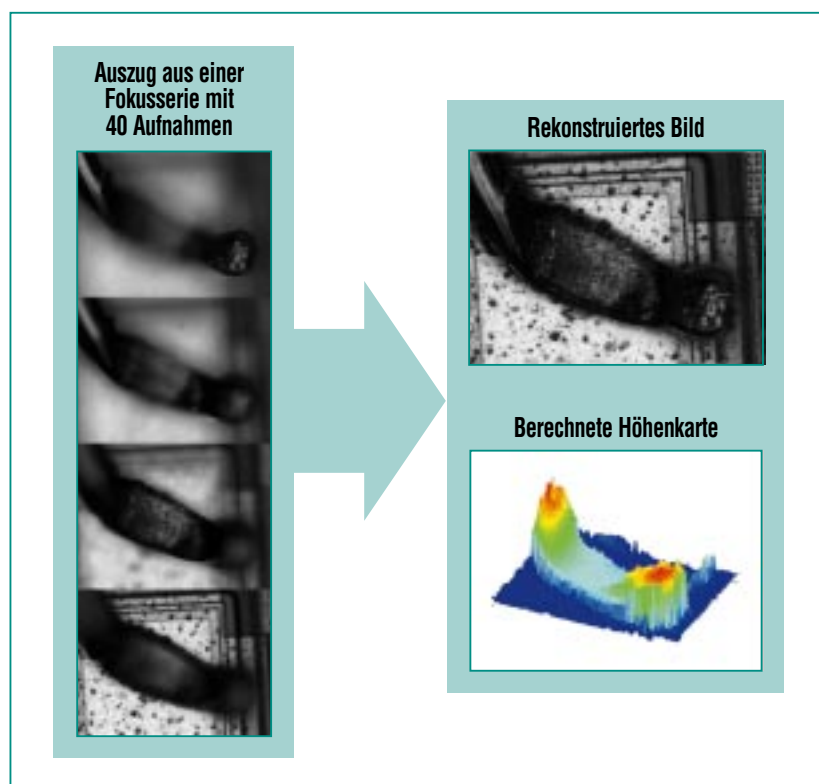


Abb. 9: Bildrekonstruktion eines Drahtbonds aus einer Fokusserie.

auf den tiefsten Bereich der Struktur. Der Fokusantrieb wird dann jeweils um ein Inkrement Δz geändert, bis auch die höchsten Strukturbereiche gut fokussiert erfasst sind. Dabei ist zu beachten, dass das Δz zwischen den einzelnen Bildaufnahmen nicht größer sein darf als die Schärfentiefe des Objektivs.

Nach Aufnahme der Fokussiererei werden die gut fokussierten Bildbereiche aus den einzelnen Bildern separiert und zu einem Bild zusammengesetzt, das in allen Bereichen gut fokussiert ist (s. Abb. 9). Zusätzlich zu diesem rekonstruierten Bild liefert das DIPLOM-System auch eine daraus berechnete Höhenkarte.

Bildrekonstruktion aus Beleuchtungsserien

Bei der Bildaufnahme von Strukturen, die stark unterschiedliches Reflexionsverhalten zeigen, kann in der Regel keine optimale Beleuchtungsintensität für das komplette Bild eingestellt werden. Wird z.B. die Beleuchtungsstärke so gewählt, dass die stark reflektierenden Bereiche nicht überstrahlt werden, so sind die schwach reflektierenden Bereiche noch sehr dunkel und kontrastarm (vgl. Bild 1 in Abb. 10). Wird die Beleuchtungsintensität erhöht, so dass die schwach reflektierenden Bildbereiche kontrastreich dargestellt werden, so sind die stärker reflektierenden

Bildbereiche deutlich überstrahlt (vgl. Bild 4 in Abb. 10). Zur Erzeugung eines kontrastreichen Komplettbildes wurde ein Algorithmus entwickelt, der aus einer Bildserie, aufgenommen mit unterschiedlichen Beleuchtungsintensitäten, ein optimiertes Bild generiert (s. Abb. 10).

Ausblick

In den vorhergehenden Abschnitten sind Werkzeuge beschrieben, die auf verschiedenen Ebenen der Mikrofertigung eingesetzt werden. Im allgemeinen wurden sie in Industrie- und Forschungsprojekten entwickelt, um ein bestimmtes Problem in einem abgegrenzten Bereich des Mikrofertigungsprozesses zu lösen. Mit dieser Vorgehensweise werden bereits lokal Verbesserungen erzielt. Um in Zukunft ein weit größere Effektivität zu erreichen, wird ein ganzheitlicher Ansatz entwickelt, der das Produkt vom Systementwurf über den Prototyp bis zur Serienproduktion begleitet.

Der ganzheitliche Ansatz besteht darin, dass der Entwurf nicht nur im Hinblick auf die Umsetzung des zur Funktionserfüllung notwendigen physikalischen Prinzips, sondern auch im Hinblick auf die Serienfertigung des Mikrosystems durchgeführt wird. Eine Voraussetzung dafür ist, dass ähnlich wie bei elektronischen Schaltkreisen, das Mikrosystem aus Grundelementen, sogenannten Elementarzellen entworfen wird. Diese Vorgehensweise soll am Beispiel von mikrooptischen Systemen illustriert werden. Eine mikrooptische Elementarzelle be-

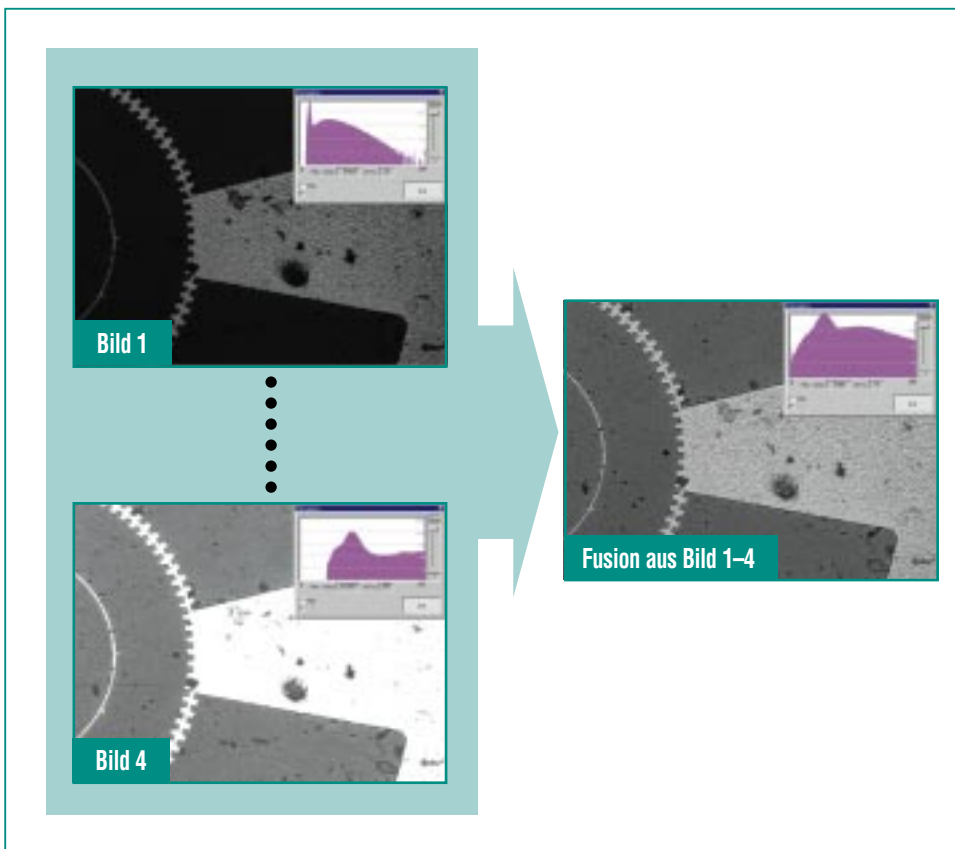


Abb. 10: Bildrekonstruktion aus einer Beleuchtungsserie mit insgesamt vier Bildern.

steht z.B. aus einer einfachen Haltestruktur, bestückt mit maximal einer passiven bzw. aktiven optischen Komponente. Zu jeder Elementarzelle existiert das CAD-Modell, ein physikalisches Modell mit allen relevanten physikalischen Eigenschaften und eine Wissensbasis mit allen für die Fertigung relevanten Design Rules und Prozessparametern. Diese Design Rules und Prozessparameter werden für die gesamte Prozesskette ausgehend von den Masken-, Lithografie, Galvanik- und Abformprozessen für die Herstellung der Einzelteile bis zu den Handhabungs- und Fügeprozessen bei der Montage erstellt.

Durch Zusammenfügen dieser Elementarzellen mit wohldefinierten Ein-/Ausgabebeziehungen

lassen sich komplexe mikrooptische Systeme aufbauen. Dabei sind noch die Wechselwirkungen der Elementarzellen untereinander auf physikalischer Ebene und auf Prozessebene zu bestimmen. Der Einsatz einer solchen bausteinorientierten Bibliothek erlaubt es, bereits dem Systemdesigner den Konstruktionsaufwand beim Entwurf und den Berechnungsaufwand bei der Simulation zu begrenzen.

Zur durchgehenden systematischen Erfassung und Verwaltung dieser Prozessparameter und Design Rules werden prozessorientierte Workflowsysteme und Wissensdatenbanken eingesetzt. In der Fertigung wird auf dieses Wissen zurückgegriffen, um weitgehend automatisch die Ferti-

gungsprozessparameter und Fertigungsmittel, z.B. Greifwerkzeuge für die Montage und Bildverarbeitungsmakros für die Qualitätssicherung abzuleiten. Durch den Einsatz dieser vorab standardisierten Werkzeuge können schnell Montagelösungen für neue hybride mikrooptische Systeme realisiert werden. Damit ist auch auf dieser Ebene eine wesentliche Voraussetzung für die schnelle Umsetzung in eine Serienproduktion gegeben.

Literatur

- [1] H. Eggert,
Statusseminar zum Verbundprojekt OMID, Seiten 1-8, 9.-10.10.2001, Bremen
- [2] M. Sumida, K. Takemoto,
J. Lightw. Techn., Seiten 305-311, 1984
- [3] I. Sieber, H. Eggert, H. Guth, K.-H. Suphan,
Symposium on Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS, Seiten 272-282, 25.-27.4.2001, Cannes
- [4] M. Dickerhof, A. Schmidt, P. Jakobs,
HICSS 35, Waikoloa, USA, 07.-10. Januar 2002, published on CD-ROM (2002)
- [5] M. Dickerhof, P. Kohlhepp, P. Jakobs, A. Schmidt,
SSGRR 6, L'Aquila, I, August 6-12, 2001 Proc. on CD ROM (2001)
- [6] U. Gengenbach, A. Hofmann, F. Engelhardt, R. Scharnowell, B. Köhler,
SPIE Photonics Boston
- [7] <http://www.iai.fzk.de/diplom>
- [8] B. Köhler, F. Eberle,
Proc. of International Conference Micro.tec 2000, September 25 – 27, 2000, Hannover, VDE-Verlag