

Für Anspruchsvolle

Multidimensionale Bildverarbeitung in der Produktion

*Bernd Jähne, Martin Brocke,
Heiko Eisele, Sören Hader,
Fred Hamprecht, Walter Happold,
Florian Raisch und Jochen Restle,
Heidelberg*

Die digitale Bildverarbeitung ist ein etabliertes Element der automatischen Qualitätskontrolle geworden, ohne das die heutigen hohen Anforderungen an die Qualität industrieller Produkte nicht zu erfüllen wären.

In den letzten Jahren wurde erkennbar, dass für anspruchsvolle Aufgaben die Verarbeitung einzelner zweidimensionaler Bilder nicht ausreichend ist. Einige Beispiele:

- Objekte, die mit einem Einzelbild nicht mehr zuverlässig erkannt werden, benötigen eine Beleuchtungsserie mit Licht, zum Beispiel aus unterschiedlichen Richtungen.

- Zur Analyse von Höhenprofilen müssen neben Grauwertbildern Tiefenkarten mit speziellen optischen 3D-Sensoren aufgenommen werden.

- Ein Einblick in das Innere von Prüfobjekten erfordert eine Auswertung von 3D-Volumenbildern.

- Prozessabläufe sind nur in Bildfolgen zu analysieren.

Diese Erweiterungen der digitalen Bildverarbeitung - erst recht in Kombination - stellen eine große Herausforderung dar. Der Mehraufwand lässt sich vergleichen mit dem Übergang von Einzelsensoren auf Bilder. Große Datenmengen sind zu verarbeiten, bei höherdimensionalen Daten versagt schnell unser Vorstellungsvermögen, und neue mathematische Methoden werden benötigt. Ein neues Forschungsfeld zeichnet sich ab, das multidimensionale Bildverarbeitung genannt wird.¹

¹ Die Robert Bosch GmbH hat der Universität Heidelberg eine C3-Professur „Multidimensionale Bildverarbeitung“ gestiftet, die in der Forschungsgruppe Bildverarbeitung am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen angesiedelt ist. Diese Stelle wurde im Oktober 2001 mit Prof. Fred Hamprecht besetzt.

Die digitale Bildverarbeitung entwickelt sich zur multidimensionalen Bildverarbeitung, einem neuen Forschungsfeld. Diese Erweiterung stellt hohe Anforderungen an die Verarbeitung großer Datenmengen und an neue mathematische Methoden. Erste Praxislösungen werden vorgestellt und künftige Entwicklungen aufgezeigt.

Bonddrahtsichtprüfung mit Beleuchtungsserien

Die Bondverbindungstechnik eines integrierten Schaltkreises (IC) mit einem gedruckten Schaltkreis oder einem anderen IC ist in der Automotive-Industrie die Standardtechnik, um diese miteinander zu kontaktieren. Wegen der hohen Qualitätsanforderungen wird jede Verbindung 100% optisch geprüft. Zunehmend verdrängen automatische optische Inspektionssysteme in der Fertigung manuelle, um mehr Objektivität und Produktivität im Qualitätssicherungsprozess zu erreichen.

Da Bonddrähte verformbare Gebilde sind und teilweise keinen Kontrast zum Hintergrund haben (Bild 1), wurde die Drahtdetektion und -vermessung mittels „Aktiver Konturen“ [1] gelöst. Um die spezielle Form der Drähte zu berücksichtigen, werden die Drahtkonturen mit einem Modell (Active Shape Model [2]) verglichen (Bild 2). Dieses translations-,

rotations- und skalierungsinvariante Modell wird über einen repräsentativen Lerndatensatz eingelernt (Point Distribution Model [3]).

Für die Gewinnung der Höheninformation werden in dieser Anwendung die Drahtschatten benutzt (Bild 3). Dafür wird mittels einer telezentrischen Beleuchtung unter definierten Winkeln jeweils von beiden Seiten der Drähte beleuchtet. Durch den gezielten Einsatz von Schatten wird nicht nur die Höheninformation gewonnen, sondern auch eine eindeutige Unterscheidung zwischen Draht und Schatten vollzogen. Die Schatten werden über eine Liniendetektion angetastet und mit den Parabeln 2. Ordnung interpoliert. Aus den Abständen zwischen der Mittellinie des detektierten Drahtes und den Parabeln werden über den Satz des Pythagoras die Höheninformationen gewonnen; dabei werden beide Höhenmessungen miteinander verglichen, um die gewonnene Redundanz zu Gunsten der Messsicherheit zu nutzen.



Bild 1. Bonddrähte haben teilweise keinen Kontrast zum Hintergrund



Bild 2. Die Drahtkonturen werden mit einem Modell verglichen



Bild 3. Gewinnung der Höheninformation aus dem Drahtschatten

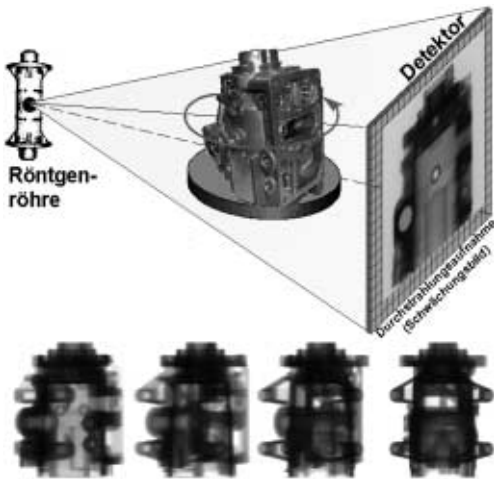


Bild 4. Die Röntgenstrahlen müssen hochenergetisch sein, um das Prüfobjekt zu durchdringen.

Die Anwendung der automatischen Sichtprüfung für Bonddrahtverbindungen zeigt, dass anhand von Vorwissen über das Produkt und dessen Eigenschaften mit recht einfachen Mitteln (zwei Beleuchtungsrichtungen, eine Matrixkamera) zusätzlich zu allen zweidimensionalen Merkmalen des Objektes dreidimensionale Informationen (Höhenverlauf des Drahtes) gewonnen werden können.

Nanometergenaue 3D-Objektvermessung

Zahlreiche Messaufgaben in der industriellen Qualitätskontrolle fordern den Einsatz der Interferometrie. Ein Aufgabenbereich ist die Vermessung von Dichtflächen hinsichtlich ihrer geometrischen Gegebenheiten (Lage, Verkippung) sowie ihrer Oberflächenparameter (z.B. Rauigkeit), hinzu kommt die Detektion von Kratzern, Löchern, Partikeln oder anderen Fehlstellen. Andere Messaufgaben sind beispielsweise die Positionsvermessung von Chips, die Höhenvermessung von Schnittkanten auf der Front des Wischgummis, die Kontrolle von Schweißnähten oder die Bestimmung der Verbiegung von Federstahl. Die wesentlichen Anforderungen sind dabei zum einen die Messzeit - der typische Fertigungstakt in der Massenproduktion der Automobilzulieferer liegt bei ca. 10 s - und zum anderen die Robustheit des Verfahrens.

Weißlichtinterferometer [4] werden beispielsweise bei der 100%-Kontrolle von Dichtflächen eingesetzt. Die Analyse der Korrelogramme erfolgt in Echtzeit, die Verwendung einer 50 Hz-Kamera er-

möglicht eine Verfahrensgeschwindigkeit von bis zu 28 $\mu\text{m/s}$. Somit ergibt sich bei einem typischen Messbereich von ca. 150 μm eine Aufnahmezeit von unter 6 s. In der bestehenden Anlage wird eine Dichtfläche auf ihre korrekte geometrische Form und auf Fehlstellen hin untersucht. Aufgrund der großen Lagetoleranz der Dichtfläche findet vor der Messung mit Hilfe eines Punkt-Triangulationsensors eine Grobpositionierung statt. Dies ist notwendig, um den Messbereich und somit die Messzeit gering zu halten. Das Weißlichtinterferometer liefert eine Höhenkarte gemeinsam mit einem Konfidenz-Bild.

Im ersten Schritt müssen Ausreißer eliminiert werden. Mit Hilfe von statistischen Untersuchungen kann das Konfidenz-Maß in die Varianz des jeweiligen Messpunktes umgerechnet werden. Daraufhin erfolgt eine Glättung der Höhenkarte, wobei die Höhenwerte mit ihrer inversen Varianz gewichtet werden. Da die Größe der verwendeten Glättungsmaske abhängig vom Konfidenz-Maß an dieser Position ist, werden Werte mit hoher Zuverlässigkeit nicht unnötig geglättet. Somit wird ein äußerst robustes Messverfahren erreicht [5]. Auf die ringförmige Dichtfläche im resultierenden Höhenbild wird eine Polartransformation angewandt und daraufhin die Verkippung der Fläche über eine Ausgleichsebene bestimmt. Des Weiteren wird eine Kratzerdetektion über einen Schwellwert auf dem in x- bzw. y-Richtung abgeleiteten Bild durchgeführt. Damit ist eine Trennung in radiale und axiale Kratzer möglich.

Eine Erhöhung der Messgeschwindigkeit um ein bis zwei Größenordnungen

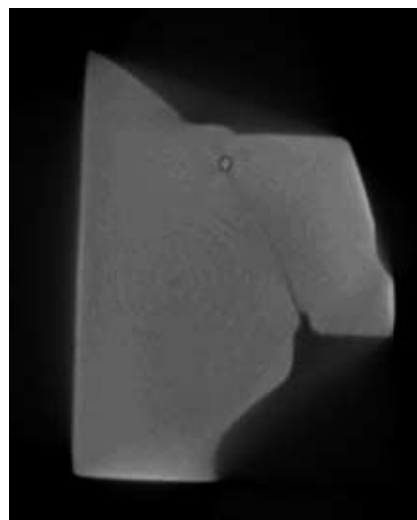


Bild 5. Lokalisieren und Vermessen der Defekte mit Hilfe der Bildverarbeitung

ist in naher Zukunft absehbar, was zur Folge hat, dass auch große Messbereiche innerhalb eines Fertigungstaktes vermessen werden können. Die steigende Prozessorleistung führt dazu, dass sich auch aufwändige Auswertearithmen der Korrelogramme in Echtzeit realisieren lassen. So ist künftig auch unter industriellen Bedingungen eine Genauigkeit in der Höhenmessung bis in den Nanometer-Bereich zu erwarten.

Röntgencomputertomographie in der Industrie

Die aus der Medizin bekannte 3D-Röntgencomputertomographie (CT) findet zunehmend in der industriellen Qualitätskontrolle Verwendung. Sie bietet die Möglichkeit, innen liegende Fehler zu detektieren und Geometrien zu vermessen. Ein klassisches Anwendungsfeld ist die Überwachung der Gussqualität. Prinzipiell eignen sich jedoch eine ganze Reihe von Objekten für die röntgenomographische Untersuchung, die neben Metallen auch aus Keramiken oder Kunststoffen gefertigt sind. Einzige physikalische Voraussetzung ist, dass die verwendete Röntgenstrahlung hochenergetisch genug ist, um das Prüfobjekt in seinem gesamten Volumen zu durchdringen (Bild 4). Drei Beispiele:

- **Qualitätsbeurteilung von Gussteilen:** Die Qualität eines Gussteils wird u. a. anhand der Poren- und Lunkenanzahl eingestuft. Klassisch wurde das Teil aufgesägt und die Defektverteilung entlang der Schnittfläche bestimmt. Mit Hilfe der Röntgen-CT kann das komplette Volumen erfasst werden. Die Bildverarbeitung lokalisiert und vermisst die Defekte (Bild 5). Es werden dreidimensionale Größenmerkmale bestimmt, aus denen sich mittels eines Vergleichs mit den Prüfvorschriften eine Gut-/Schlecht-Aussage ableiten lässt.

- **Überwachung von Laserschweißprozessen:** Poren, die als Schweißfehler unterhalb der geschweißten Naht liegen, sind somit einer Oberflächenprüfung nicht zugänglich (Bild 6). Die Bildverarbeitung detektiert die Poren und vermisst anhand ihrer Randpixel die Hauptausdehnungsrichtungen mit einem ähnlichen Verfahren wie bei der Defekterkennung in Gussteilen.

- **Risserkennung:** Eine besondere Herausforderung stellt die Erkennung von Rissen dar, die aufgrund ihres schwachen Kontrastes im Röntgenbild nur

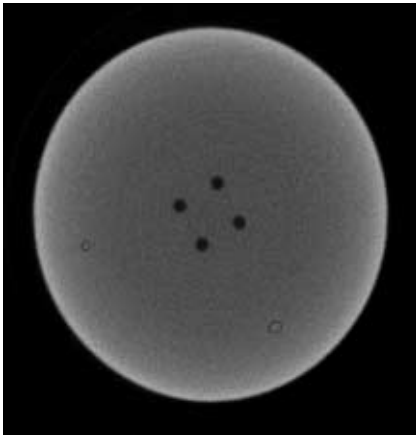


Bild 6. Poren unterhalb einer geschweißten Naht sind für eine Oberflächenprüfung nicht zugänglich

schwer erkennbar sind (Bild 7). An diesem Beispiel lässt sich verdeutlichen, dass das Volumenbild als Ganzes verarbeitet werden muss, d. h. eine Schicht-für-Schicht-Bildanalyse nicht ausreicht: Verläuft der Riss zufällig senkrecht zur betrachteten Schicht, so kann er nicht entdeckt werden. Da der Rissverlauf natürlich nicht von vornherein bekannt

ist, müssen dreidimensionale Nachbarschaftsbeziehungen zur sicheren Detektion ausgewertet werden [6].

Die Röntgen-CT ist ein vielseitig anwendbares und leistungsfähiges Prüfverfahren. Weiterentwicklungen in der Technik sowie in der automatisierten Auswertung von Volumenbilddaten werden dafür sorgen, dass es neben Laborprüfeinrichtungen auch in der Serienfertigung Verwendung finden wird.

Online-Prozesskontrolle beim Laserschweißen

Ein neuer Ansatz der Qualitätssicherung beim Laserschweißen ist die bildgestützte Überwachung des Schweißprozesses selbst. Auf diese Weise erhält man räumlich aufgelöste Informationen aus der Entstehungsphase möglicher Fehler. Die Anforderungen einer hohen Helligkeitsdynamik und schneller Prozesse erfüllen die in den letzten Jahren auch für den Einsatz in der Produktion entwickelten CMOS-Kameras [4]. Die logarithmische Kennlinie erlaubt den Blick in den Laser und die Schmelze (Bild 8). Der wahlfreie

Zugriff auf relevante Bildregionen erhöht die Bildrate, so dass man von Bildfolgen im Sinne eines Films statt vormals nur Einzelbildern sprechen kann.

Die Bilddaten werden mit einer weitgehend parameterfreien Algorithmik ausgewertet [7, 8]. Methoden, die auf den Differenzen nur zweier aufeinander folgender Bilder arbeiten, sind wegen des hohen Rauschens und der Unruhe des Prozesses kein gangbarer Weg. Es wird für jeden Prozess ein mittleres Bild für einen fehlerfreien Prozess berechnet. Hierdurch können Anpassungen bei Driften oder Umrüstungen vermieden werden. Als Maß für die Abweichung eines einzelnen Pixels während des Verlaufes der Schweißung kann dann die Differenz der Bildfolge von diesem mittleren Prozessausschneiden dienen. Diese varianznormierten Abweichungen nehmen hohe Werte an, wenn Spritzer, Aufhellungen oder andere Leuchterscheinungen schlagartig auftreten (Bild 10).

Die Klassifikation der auftretenden Spritzer ist ein Hauptbestandteil des entwickelten Systems (Bild 9). Die Pixelausreißer treten bei Spritzern räumlich ge-

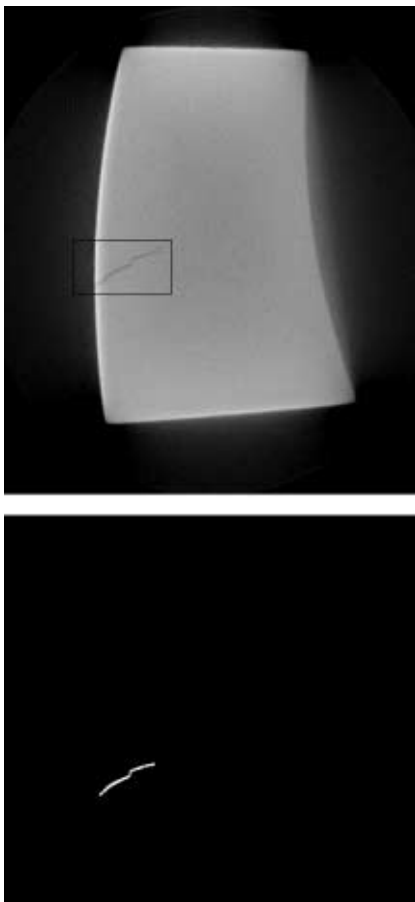


Bild 7. Die Risserkennung ist eine besondere Herausforderung

häuft auf. Deshalb werden die Pixelereignisse je Einzelbild segmentiert. Die einzelnen Gruppen bilden die Objekte für die anschließende Klassifikation. Von ihnen werden Standardmerkmale extrahiert, unter anderem Flächeninhalt, Momente 2. Ordnung, Rundheit und räumliche Ausrichtung.

Es wird eine automatische Merkmal-selektion vorgenommen. Als Klassifikator wird ein Polynom-Klassifikator verwendet [9]. Im Gegensatz zu neuronalen Ansätzen lassen sich seine Parameter analytisch geschlossen berechnen. Langwierige Iterationsschritte sind nicht notwendig, was den Vorteil hat, dass viele Merkmalkombinationen innerhalb eines festen Zeitrahmens bewertbar sind.

Die Entscheidungen auf der Bildebene müssen zum Schluss zu einer Gesamtentscheidung zusammengefasst werden. Spritzer kommen nicht nur räumlich zusammenhängend vor, sondern auch zeitlich. Deshalb werden die Klassifikationswerte von aufeinander folgenden Bildern zu einem Wert zusammengefasst und mit einem Schwellwert verglichen.

Das Systemkonzept hat sich in der Praxis bewährt. Durch den Einsatz neuartiger CMOS-Kameras und die Hinzunahme räumlicher und zeitlicher Informationen konnte im anspruchsvollen Umfeld der vollautomatisierten industriellen Massenproduktion eines Automobilzulieferers für eine Laserschweißverbindungsnaht die Qualitätssicherung durch Prozesskontrolle realisiert werden, die durch den Blick in das Schweißen auch Zugang zu den physikalischen Ursachen der Spritzer und damit ein tieferes Verständnis erlaubt. Unter der Vorgabe, dass möglichst alle fehlerhaften Schweißungen erkannt werden, liegt die Rate der Pseudofehler im Promillebereich.

Literatur

- 1 Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D.: Snakes: Active Contour Models; in: International Journal of Computer Vision, Bd.2, Nr. 3, 1988, S. 321-331
- 2 Cootes, T. F., Taylor, C. J.: Active Shape Models - Smart Snakes; in: Proc. British Machine Vision Conference, Springer-Verlag, 1992, S. 266-275
- 3 Cootes, T. F., Taylor, C. J., Cooper, D. H., Graham, J.: Training Models of Shape from Sets of Examples; in Proc. British Machine Vision Conference, Springer-Verlag, 1992, S. 9-18
- 4 Jähne, B., Haußecker, H., Geißler, P.: Handbook of Computer Vision and Applications, Volume 1, Sensors and Imaging, Academic Press, San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto, 1999
- 5 Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.H.: The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Springer Series in Statistics, New York, 2001.

- 6 Eisele, H., Hamprecht, F. A.: A new approach for defect detection in X-ray CT images; in: Van Gool, L. (Hrsg.): Mustererkennung 2002, 24. DAGM Symposium Zürich, Serie LNCS, Springer-Verlag, 2002, S. 345-352
- 7 Brocke, M., Schmidt, M. et al.: Verfahren zur automatischen Beurteilung von Laserverarbeitungsprozessen, Deutsches Patent DE 10103255, Offenlegung 14.08.2002
- 8 Brocke, M.: Statistical Image Sequence Processing for Temporal Change Detection; in: Van Gool, L. (Hrsg.): Mustererkennung 2002, 24. DAGM Symposium Zürich, Serie LNCS, Springer-Verlag, 2002, S. 215-223
- 9 Schürmann, J.: Pattern Classification: A Unified View of Statistical and Neural Approaches, Wiley & Sons, 1996

Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Phys. Martin Brocke, geb 1972, studierte Physik an den Universitäten Göttingen, Heidelberg und Toulouse. Mit industrieller Bildverarbeitung beschäftigt er sich seit 1997 am Lehrstuhl von Prof. Jähne (IWR der Universität Heidelberg), wo er in Zusammenarbeit mit der IBM storage systems GmbH Mainz eine Diplomarbeit anfertigte und seit 1999 an seiner Promotion in der Forschung/Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH arbeitet.

Heiko Eisele, Master of Science, geb. 1973, studierte angewandte Physik an der California State University, Long Beach, USA. Seit 1999 promoviert er auf dem Gebiet der automatisierten Auswertung von Röntgen-CT-Bildern bei der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen.

Dipl.-Inf. Sören Hader, geb. 1974, studierte von 1993 bis 1999 Informatik an der Technischen Universität Ilmenau. Mit Bildverarbeitung, Bildverstehen und statistischen Lernverfahren beschäftigt er sich seit 1999, zuerst als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum der DaimlerChrysler AG in Ulm im Bereich Bildverstehen und seit Juli 2001 als Doktorand in der Forschung/Vorausentwicklung

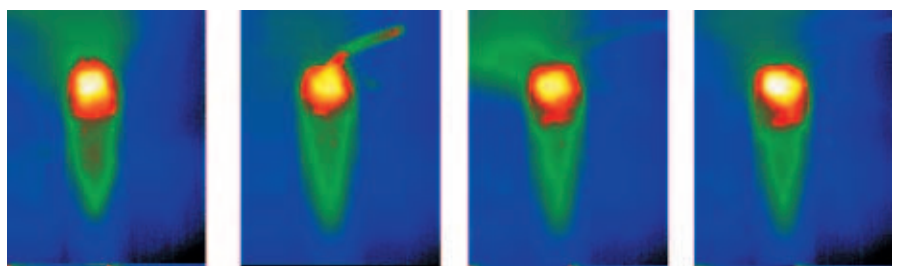


Bild 8. Blick in den Laser und die Schmelze



Bild 9. Klassifikation der auftretenden Spritzer

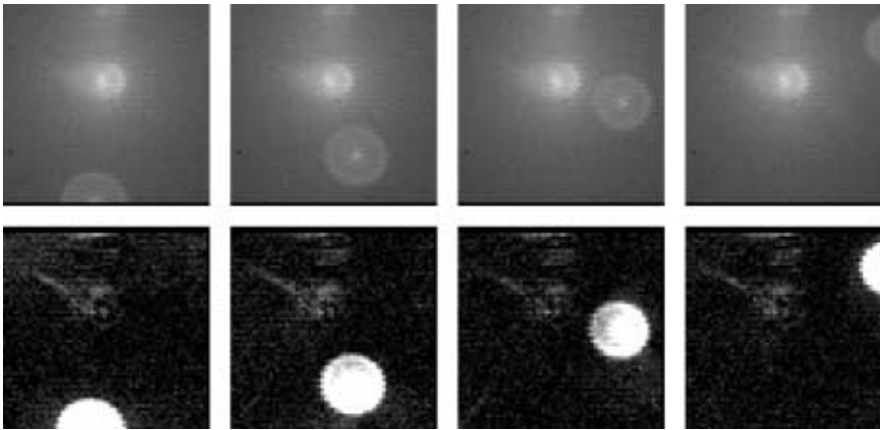


Bild 10. Die varianznormierten Abweichungen nehmen hohe Werte an, wenn Spritzer, Aufhellungen oder andere Leuchterscheinungen plötzlich auftreten

lung der Robert Bosch GmbH zum Thema „Data Mining in der Industriellen Bildverarbeitung“.

Prof. Dr. Fred A. Hamprecht, geb. 1975, studierte Chemie an der ETH Zürich, an der EPF Lausanne, am Imperial College und der University of Cambridge. Nach einer Dissertation über Datenanalyse an der ETH Zürich und einem PostDoc am Seminar für Statistik wurde er im Herbst 2001 auf die von Bosch gestiftete Professur für Multidimensionale Bildverarbeitung berufen. Sein Interesse gilt der Analyse von ein- und höherdimensionalen Signalen besonders mit Methoden der räumlichen Statistik sowie der Klassifikation und der explorativen Datenanalyse.

Dipl.-Ing.(FH) Walter Happold, geb. 1952, studierte Physikalische Technik an der Fach-

hochschule Heilbronn. Seit 1976 arbeitet er in der Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH. Er ist in der Abteilung Fertigungsautomatisierung verantwortlich für die Gruppe „Industrielle Bildverarbeitung und Fertigungsmesstechnik“. Aufgabe der Gruppe ist es, gezielt neue Prüfverfahren und Bildauswertestrategien zu entwickeln, um damit aktuelle, neue Aufgaben in der automatisierten Fertigung zu lösen. Sein aktuelles Entwicklungsinteresse liegt im Bereich der multidimensionalen Bildverarbeitung.

Prof. Dr. Bernd Jähne, geb. 1953, studierte Physik an den Universitäten Saarbrücken und Heidelberg. Diplom, Promotion und Habilitation in Physik erfolgten an der Universität Heidelberg in den Jahren 1977, 1980 und 1985. Im

Jahre 1992 habilitierte er sich in Angewandter Informatik an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Seit 1988 hat er eine Forschungsprofessur am Scripps Institut für Ozeanographie der Universität von Kalifornien in San Diego inne, und seit 1994 ist er Professor für Physik an der Universität Heidelberg und leitet am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen die Forschungsgruppe Bildverarbeitung. Seine Forschungsinteressen gelten sowohl den Grundlagen der Bildverarbeitung als auch deren Anwendungen in den Naturwissenschaften und der Industrie.

Dipl.-Ing. Florian Raisch, geb. 1972, studierte Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Telekommunikation an der Universität Stuttgart. Mit digitaler Bildverarbeitung beschäftigt er sich seit seiner Diplomarbeit am Institut für Physikalische Elektronik (IPE) der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der Daimler Chrysler AG. Im Oktober 1999 begann er eine Promotion mit dem Thema „Automatische Bonddrahtsichtprüfung“ in der Forschung/Vorausbildung der Robert Bosch GmbH.

Dipl.-Phys. Jochen Restle, geb. 1973, studierte Physik an der Universität Tübingen. Seine Diplomarbeit fertigte er in Zusammenarbeit mit der Hewlett-Packard GmbH im Bereich Medizintechnik an, wobei er sich mit der Analyse von Atemgasen in Kombination mit Messungen des Volumenstroms beschäftigte. Seit 1999 promoviert er im Bereich der industriellen Bildverarbeitung in der Forschung/Vorausbildung der Robert Bosch GmbH zum Thema „Aufnahme und Verarbeitung von 3D-Daten mittels Weißlichtinterferometrie“.