

Dipl.-Ing. R. Nestler/ Dipl.-Ing. L. Jacob

Untersuchung von Verfahren zur Auswertung von Fokussereien in der Waferinspektion

Hochauflösende, lichtmikroskopische Abbildungssysteme, wie sie heutzutage zunehmend Bestandteil automatischer Inspektionssysteme sind, weisen oftmals eine geringere Schärfentiefe auf als die Tiefenausdehnung der abzubildenden Strukturen. Da in diesem Fall ein Bildeinzug nicht das gesamte Untersuchungsobjekt mit der notwendigen Auflösung zur Verfügung stellt, wird die Aussagekraft der nachfolgenden Auswerteschritte eingeschränkt. Neben der konfokalen Mikroskopie oder SEM-Verfahren, die aufwendig, für die lückenlose Inspektion nicht praktikabel und bei bestimmten Anwendungsfällen nicht geeignet sind, ist die Erfassung und Auswertung von Bildserien (Fokussereien) ein relativ einfacher Ansatzpunkt zur Verminderung dieses Informationsverlustes. Hier werden die vorhandenen und im allgemeinen günstigen gerätetechnisch-optischen Voraussetzungen konventioneller Mikroskopanordnungen genutzt, um unter Einhaltung gewisser Randbedingungen den erforderlichen Tiefenbereich „durchzufokussieren“. Dieses Vorgehen hat den weiteren Vorteil, daß die diesbezügliche Erweiterung einer bestehenden Inspektionssysteme einfach realisierbar ist, da das Zusammenführen der Informationen aus der Bildserie lediglich auf algorithmischer Ebene erfolgt. Das Ziel dieses Beitrages ist es, am Beispiel der Waferinspektion eine Systematik zu den prinzipiellen Möglichkeiten der Erfassung und Verarbeitung mikroskopischer Fokussereien anzugeben.

1 EINLEITUNG

Das Vordringen der Bildverarbeitung in mikroskopische Grenzbereiche, z.B. infolge der abnehmenden Strukturbreiten in der Wafertechnologie, führt zu neuen Herausforderungen an die hier zur Anwendung kommenden Inspektionssysteme. Erfolgt die Bildaufnahme unter Verwendung eines konventionellen Lichtmikroskops, so hat dieser Trend eine stetige Vergrößerung des notwendigen optischen Auflösungsvermögens zur Folge. Die komplementäre Beziehung zwischen lateralem Auflösungsvermögen und Schärfentiefe gewinnt in diesem Fall eine besondere Bedeutung [1].

Die Verringerung der Schärfentiefe unter die Tiefenausdehnung der abzubildenden Strukturen führt aus der Sicht von Inspektionssystemen zu zahlreichen Problemen. Diese resultieren im wesentlichen aus der Tatsache heraus, daß mit dem Verlassen des ebenen Abbildungsfalles¹ ein Bildeinzug nicht mehr die gesamte Szeneninformation repräsentiert.

Damit verbunden sind negative Auswirkungen sowohl auf die Defektsensitivität, da bezüglich einer Bildebene nicht jede Objektregion mit der geforderten Auflösung abgebildet wird, als auf die Defektselektivität der Inspektionssysteme, da die zur korrekten Klassifikation notwendige, vollständige Erfassung tiefenausgedehnter Fehlererscheinungen nicht gewährleistet ist.

Ein weiterer Aspekt betrifft das automatische Finden der optimalen Fokusebene² durch die Fokussteuerung des Abbildungssystems. Üblicherweise wird die Entscheidung bei

¹ Nachfolgend wird der Fall, daß die Tiefenausdehnung der *räumlichen Szene* den Schärfentiefebereich nicht überschreitet, als *ebener Abbildungsfall* bezeichnet. Trifft diese Bedingung nicht zu, so liegt aus optischer Sicht eine *räumliche Abbildung* vor.

² Als *Fokusebene* soll die nahezu zentral im Schärfentiefebereich gelegene Ebene des Objektraumes bezeichnet

Mikroskopanordnungen durch Variation der Objektweite und gleichzeitiger Auswertung projizierter Muster in einer endlichen Zahl kleiner Meßregionen der Szene gewonnen. Die Verteilung der Meßregionen bezüglich des Bildausschnitts ist hierbei aufgrund der gerätetechnischen Voraussetzungen fest. Für den räumlichen Abbildungsfall gewinnt diese Aufgabe eine neue Qualität. Hier existiert nicht nur *die* eine optimale Fokusebene, sondern, in Abhängigkeit von den nachfolgenden Aufgabenstellungen, eine oder mehrere Ebenen, welche die *relevante Szeneninformationen*, z.B. Texturinformationen ausgewählter Schichten, beinhalten. Dieser Umstand läßt die Einbeziehung des gesamten Bildinhaltes in die Steuerung der Bildauswahl als sinnvoll erscheinen. Im Gegensatz zur Störungsempfindlichkeit bei der Auswertung weniger, fest verteilter Meßregionen, wie z.B. durch sich ändernde Reflexionseigenschaften (Defekte, Glanz) oder durch die nicht repräsentative Höhenverteilung, bietet das bildinhaltsgesteuerte Vorgehen einen robusten und flexiblen Lösungsansatz. Der zur Ermittlung des optimalen Bildes notwendige Zeitaufwand dürfte vernachlässigbar sein. Ausgehend von den bisherigen Überlegungen lassen sich folgende Teilaufgaben zur Unterstützung mikroskopischer Inspektionslösungen durch die Auswertung von Fokussereien formulieren (siehe dazu Abb. 1).

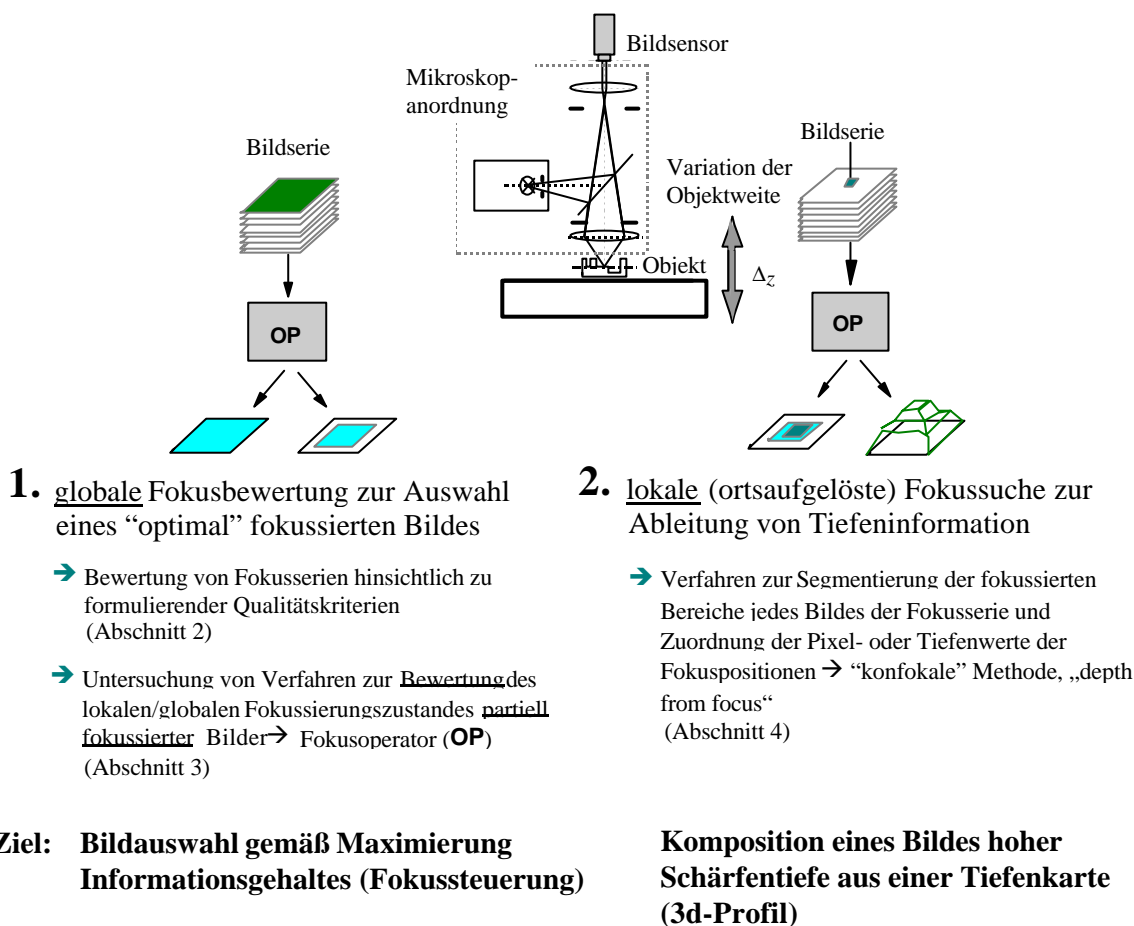


Abb. 1: Überblick über wesentliche Aspekte zur Verarbeitung von mikroskopischen Fokussereien

werden, die scharf in die Sensorebene im Bildraum abgebildet wird. Das Vorliegen einer scharfen Abbildung richtet sich dabei sowohl nach wellen- bzw. strahlenoptischen Gesichtspunkten als auch nach der verfügbaren Sensorauflösung. Im ebenen Fall ist die optimale Fokusebene dadurch gekennzeichnet, daß sich das gesamte abzubildende, räumliche Objekt innerhalb des objektseitigen Schärfentiefebereiches befindet.

1. Flexible Fokussteuerung und optimale Bildauswahl durch Bewertung jedes Bildes der Fokusserie

Der verfügbare Informationsgehalt jedes Bildes der Fokusserie ist eine von der Zielstellung des nachfolgenden Bildverarbeitungsprozesses (reine Fokussteuerung bei ebenen Abbildungsfällen, Aufmerksamkeitssteuerung auf einzelne Schichten bei räumlichen Abbildungsfällen usw.) abhängige Kenngröße. Diese charakteristische Eigenschaft wird mit Methoden der Bildverarbeitung bestimmt und bildet die Grundlage für die Bildauswahl (*passive Fokusverfahren*). Zu diesem Punkt gehören daher Überlegungen zu Randbedingungen, welche die Qualität einer Fokusserie bestimmen, zu Möglichkeiten zur Bewertung des Fokuszustandes aus der ikonischen Bildinformation von Regionen variabler Größe (Fokusoperator) und zur Verarbeitung der ermittelten bild- oder regionenbezogenen Fokusmaße (Fokusfunktionen).

2. Ermittlung und Einbeziehung von 3d-Informationen durch orts aufgelöste Fokussuche

Hierbei steht aus der Sicht der Inspektion nicht die orts aufgelöste Tiefenmessung im Vordergrund, sondern vorrangig die Überwindung des komplementären Zusammenhang zwischen Schärfentiefe und Auflösungsvermögen. Das Ziel der Überlegungen die Synthese eines Bildes, welches sich sowohl durch eine hohe Ortsauflösung als auch durch eine hohe Schärfentiefe auszeichnet und außerdem dieselben optischen Eigenschaften (z.B. das spektrale Remissionsverhalten → Farbinformation) repräsentiert. Derartige Bilder sind mit den bekannten, aufwendigen Aufnahmeverfahren, wie SEM, nicht erzielbar.

Die Abgrenzung zwischen dem hier verwendeten *passiven Fokusverfahren unter Verwendung einer den gesamten Tiefenbereich umfassenden Fokusserie* und den weiteren Möglichkeiten zur Auswertung von Fokusinformation kann in Rahmen dieses Beitrags nicht vorgenommen werden. Ausführliche Informationen zu aktiven und passiven Techniken und zu Verfahren, die auf der Grundlage von Abbildungsmodellen arbeiten, können der angegebenen Literatur entnommen werden [1][2][3]. Für hoch aufgelöste mikroskopische Anwendungsfälle, so auch für die Waferinspektion, wird die Verfahrensauswahl wie folgt begründet [1].

1. Die mikroskopische Abbildung der untersuchten technischen Szenen³, insbesondere der relevanten Objektdetails (Höhenübergänge und Regionenübergänge zwischen Bereichen unterschiedlichen Remissions- und Absorptionsverhaltens), kann nicht durch lineare Modelle beschrieben werden. Der Bildformationsprozeß ist grob durch die Überlagerung defokussierungsabhängiger, ortsvariant kohärenter, d.h. bezüglich der ursächlichen Lichterregung örtlich korrelierter, Beugungsfiguren beschrieben. Insbesondere durch die örtliche Kohärenz, herrührend von der teilkohärenten Beleuchtung, kommt es im Bildraum zu Interferenzerscheinungen, die in der Größenordnung der Pixelauflösung liegen und somit als zusätzliche irrelevante Strukturierung wahrgenommen werden können. Aufgrund des Zusammenspiels mit zahlreichen weiteren Einflußfaktoren, wie z.B. der Beugung an der Objektfunktion, dem zeitlichen Kohärenzverhalten der Beleuchtung und dem Remissions- und Absorptionsverhalten der Oberfläche, steht eine nutzbare analytische Beschreibung der mikroskopischen Abbildung räumlicher Strukturen nicht zur Verfügung.
2. Die Projektion eines Lichtmusters als Voraussetzung für aktive Verfahren ist in der hochauflösenden Lichtmikroskopie ungebräuchlich. Sowohl bei der Projektion als auch bei der Abbildung des modulierten Musters kommt es durch oben beschriebene mikrooptische Abbildungseffekte zu Verfälschungen, die eine eindeutige Auswertung behindern.

³ Bei den hier untersuchten Waferstrukturen handelt es sich um *technische Szenen*, die dadurch charakterisiert sind, daß sie verhältnismäßig wenige Höhenstufen, begrenzt von abrupten Übergängen beinhalten.

3. Die Notwendigkeit, zur Fokussteuerung eine Bildserie zu erfassen, legt es nahe, die gesamte akkumulierte Information auch zur Gewinnung von orts aufgelöster Tiefeninformation zu nutzen.

2 AUFNAHMEKRITERIEN FÜR OPTIMALE MIKROSKOPISCHE FOKUSSERIEN

Den Fokuszustand eines Bildeinzuges global oder lokal (orts aufgelöst) zu bewerten, erfordert Szenen, die über diese Bildinformation mit ausreichendem Signal-Rausch-Verhältnis verfügen. Die notwendige Information eines Bildes widerspiegelt sich in den Kontrastverhältnissen der von den abgebildeten Szeneneigenschaften hervorgerufenen Texturierung. Eine Fokussierungs-änderung durch Variation der Objektweite führt zu einer Kontrastdisparität *korrespondierender Bildregionen*⁴, deren Feststellung den Ansatzpunkt zur Fokusbewertung darstellt. Problematisch ist hierbei, daß die zu beobachtende Disparität nicht ausschließlich Folge des Einflusses der Defokussierung auf die Abbildung der relevanten Szeneneigenschaften ist. Insbesondere bei hohen Ortsauflösungen⁵ sind deshalb die Voraussetzungen für die Auswertung von Fokusserien nicht optimal. Untersuchungen haben gezeigt, daß sich Störungen bei der Einbeziehung großer Bildregionen in die Bewertung der Fokussierung nur wenig auswirken. Dagegen muß die Signifikanz der Aussagen bei orts aufgelöster Fokusbewertung als eher gering eingeschätzt werden [1].

Die nachfolgende Tabelle benennt Kriterien und, darauf bezogen, positive (+) bzw. negative (-) Einflußfaktoren mikroskopischer Anordnungen im einzelnen.

Kriterium	Einflußfaktoren aus Sicht mikroskopischer Anordnungen
1. Pixelkorrespondenz → optisch → mechanisch	+ objektseitig telezentrischer Strahlengang + hohe mechanische Stabilität und Positioniergenauigkeit - hohe Ortsauflösungen
2. Vollständigkeit & Genauigkeit	+ geringe Schärfentiefe + Verhältnis zwischen Telezentrie- und Schärfentiefebereich und zu erfassendem Tiefenbereich

⁴ Korrespondierende Bildregionen einer Bildserie sind das Abbild ein und derselben Objektregion unter verschiedenen Bedingungen.

⁵ Pixelauflösung des Bildaufnahmesensors im Objektraum

Kriterium	Einflußfaktoren aus Sicht mikroskopischer Anordnungen
	– Einfluß der Beugungsbegrenzung
3. Szeneneigenschaften & Grauwertverteilung	<ul style="list-style-type: none"> – geringer Signal-Rausch-Abstand zwischen szenenstrukturgebundener Disparität (Kontrast) und Störungen (siehe unten) – irrelevante Struktur, d.h. ortsvarianter Störeinfluß, durch <ul style="list-style-type: none"> → extreme Defokussierung & Defokussierungsrauschen⁶ → Abbildungseffekte (z.B. Interferenzen durch partiell kohärente Beleuchtung insbesondere bei hohen Ortsauflösungen, Beugungserscheinungen an Höhenstrukturen) → Pixelrauschprozesse → optisches Verhalten der Objektfunktion → Abschattungen und Glanz im makroskopischen Sinne

3 OPTIMALE BILDAUSWAHL DURCH FOKUSGESTEUERTE BILDBEWERTUNG

Die Übersicht in Abb. 2 enthält eine Systematik der für die Ermittlung von Fokusmaßzahlen zur Charakterisierung des Fokussierungszustand eines Bildes bzw. Bildbereiches vorhandenen Möglichkeiten. Hierbei wird die bestehende Korrelation zwischen dem Kontrast und dem Fokussierungszustand zugrunde gelegt [1]. Mit Operatoren der Gruppe 1 ist die orts aufgelöste Fokussuche realisierbar, mit Operatoren der Gruppe 2 die Fokussteuerung.

Die Auswahl des geeigneten Fokusoperators (vor allem die Strukturanpassung und Koppelweite bei Operatoren der Gruppe 1), die Beurteilung von dessen Eigenschaften bezüglich des Bildmaterials und die Verfahrensauswahl zur Interpretation der ermittelten fokusbewertenden Maßzahlen erfolgt spezifisch für den Anwendungsfall bzw. für die jeweilige Zielstellung und soll daher hier nicht weiter diskutiert werden.

Für die zur Verfügung gestellten Fokusserien von Waferstrukturen (Abb. 4 zeigt ein Beispiel) erweisen sich zur Fokussteuerung Operatoren der Gruppe 2 als sinnvoll, die zur Ermittlung des Fokusmaßes für jedes Bild die ortsbezogenen Ergebnisse von Teilregionen schwellwertgesteuert aufsummieren. Als Ergebnis liegen Fokusfunktionen vor, die entgegen der in vielen Publikationen angenommenen, nur leicht gestörten Unimodalität⁷ einen ausgeprägten multimodalen Verlauf aufweisen. Deren Auswertung erfordert weitergehende Überlegungen, die immer in Zusammenhang mit den Szeneneigenschaften zu sehen sind [1]. Zur Ermittlung der ortsbezogenen Fokusmaßzahl sind die kombinierten Operatoren der Gruppe 1a und die der Gruppe 1b gut geeignet. Diese erweisen sich als flexibel und tragen den besonderen Eigenschaften von Szenen mit unterschiedlich texturierten Regionen und mehreren Höhenstufen Rechnung. In Abb. 5, Bilder 1-3, sind verschiedene Ergebnisse der automatischen Bildauswahl dargestellt. Die gewählten Operatoren bestimmen, ob auf die kontrastreichen Regionen

⁶ Als Defokussierungsrauschen wird der systemtheoretisch nachweisbare Einfluß auf das Übertragungsverhalten des Abbildungssystems durch die Existenz benachbarter, unterschiedlich defokussierter Bildregionen bezeichnet [1]. Prinzipiell verschlechtern sich bei Existenz des Defokussierungsrauschens die Übertragungseigenschaften des optischen Systems selbst für die fokussierten Bereiche.

⁷ Das geschätzte Maximum kennzeichnet den bestfokussierten Zustand.

(Bild 1) bzw. die markierte kontrastarme Region (Bild 2) fokussiert werden soll oder ein Bild mit maximalem Strukturgehalt von Interesse ist (Bild 3).

4 GEWINNUNG VON 3D-INFORMATIONEN DURCH ORTSAUFGELÖSTE FOKUSSUCHE

Bei der orts aufgelösten Fokussuche wird nach dem in Abb. 3 dargestellten Prinzip verfahren. Durch Anwendung eines lokalen Fokusoperators der Gruppe 1 (siehe Abb. 2) auf der Bildserie erhält man im ersten Schritt Merkmalskarten, welche die pixelbezogenen Fokusbewertungen beinhalten. Die Fokusmaßzahlen einer korrespondierenden Region (in der Abbildung als *Merkmal* bezeichnet) ergeben, nach eventuell nochmaliger Verknüpfung⁸, die lokale Fokusfunktion. Diese bildet die Grundlage zur Schätzung der Tiefenkarte, welche wiederum die Synthese des Bildes hoher Schärfentiefe steuert.

Wie bereits beschrieben, wird die Fokusbewertung und somit auch die Fokussuche anhand kleiner Bildregionen als sehr unsicher betrachtet. Die Ursache ist das schlechte Signal-Rausch-Verhältnis der Szenenstruktur bezüglich der auftretenden Störungen (siehe Abschnitt 2). Eine wichtige *Beobachtung* im Zusammenhang mit den hier untersuchten Waferstrukturen ist das Auftreten kontrastreicher Artefakte in der Umgebung von Höhenkanten bei der Defokussierung, was zur Kantenverbreiterung und zur Verringerung der Kantensteilheit führt. Hinzu kommt, daß die regionalen Textureigenschaften stark variieren⁹ können, was eine stetige Anpassung des verwendeten Operators notwendig machen würde. Aus diesem Grund wird die Ermittlung und Einbeziehung einer *ortsvarianten Signifikanzbewertung* in die Schätzung der optimalen Fokusebene als wesentlich erachtet. Diese Kenngröße kann, wie in der Abbildung angedeutet, aus der Form und dem Wertebereich der Fokusfunktion sowie aus der ursprünglichen Bildinformation ermittelt werden. Die resultierende lückenhafte Tiefenkarte muß anschließend ebenfalls signifikanzgesteuert und unter Einbeziehung des verfügbaren a-priori-Wissens, z.B. über die Höhen- oder Regionenverteilung, geschlossen werden.

Eigene Untersuchungen zeigen, daß wenig beeinflusst von diesen Problemen die Synthese des Bildes hoher Schärfentiefe mit gutem Ergebnis (Abb. 5, Bild 4) gelingt. Das liegt daran, daß Regionen mit unsicherer Tiefenaussage sich zu einem großen Prozentsatz durch fehlende oder nur kontrastschwache Szenentexturierungen auszeichnen. Hier ist die Zuordnung des Pixelwertes einer beliebigen Fokusebene, der Ebene des nächsten signifikanten Nachbarn oder auch eines Mittelwertes zwischen signifikanten Nachbarn mit nur geringen Fehlern verbunden. Fehlzuzuordnungen in kontrastreichen Regionen der Szene, hervorgerufen von starken Störeinflüssen, wirken sich jedoch deutlich aus.

⁸ zu Lasten der erzielbaren Auflösung der Tiefenkarte

⁹ Die Variation reicht bis zu Regionen ohne Texturierung, d.h. ohne Fokusaussage.

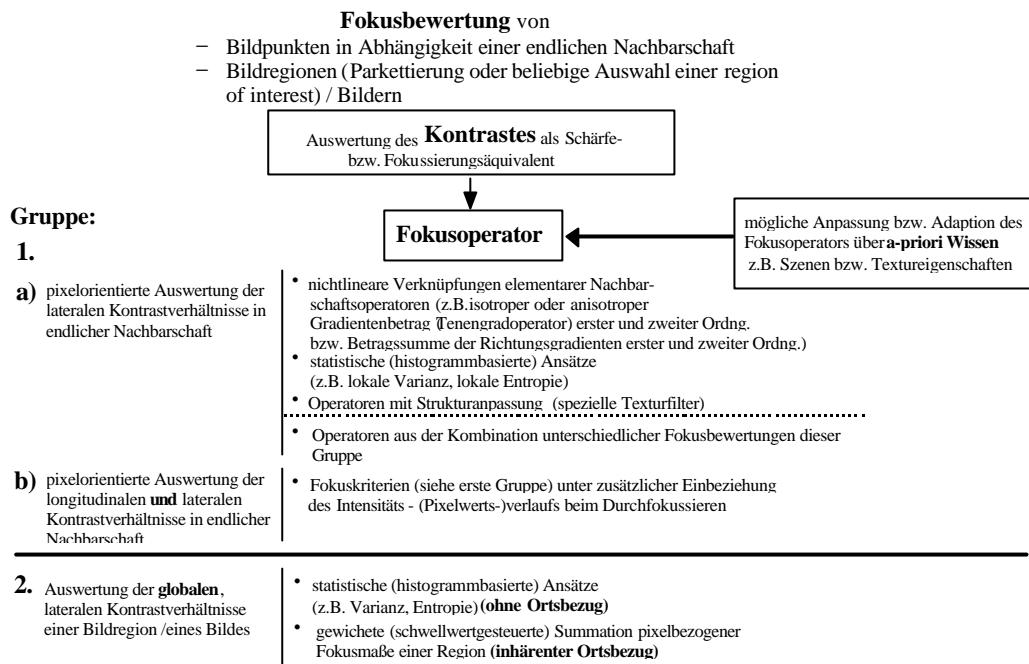


Abb. 2: Bildinhaltsbezogene Ermittlung von Fokusmaßzahlen zur Charakterisierung des Fokussierungszustand von Bildpunkten/Bildregionen/Bildern

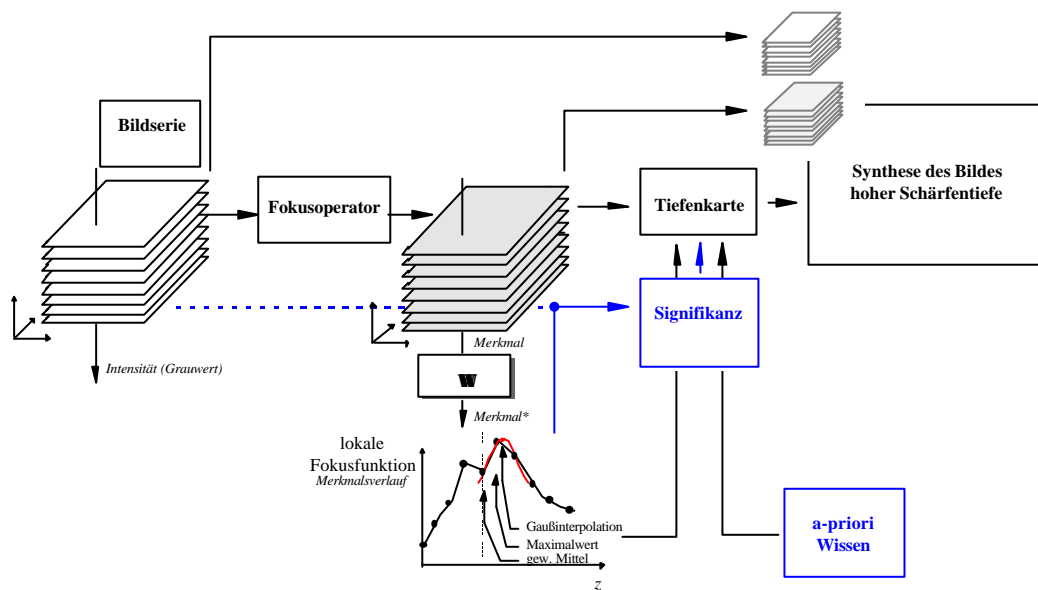


Abb. 3: Prinzip der ortsaufgelösten Fokussuche

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zusammenfassend und unabhängig von der Spezifik der konkreten Anwendung ist zu sagen:

1. Die Auswertung von mikroskopischen Fokusserien mit passiven Verfahren erlaubt bei Erfüllung der beschriebenen Qualitätskriterien die einfache Erweiterung bestehender Inspektionsmöglichkeiten um eine bildinhaltsbezogene Fokussteuerung des Aufnahmesystems und um das Bild hoher Schärfentiefe.
2. Die Verwertbarkeit der ortsaufgelösten Tiefeninformation aus der Kontrastbewertung zum Aufbau eines Oberflächenprofils wird insbesondere bei hohen Ortsauflösungen als gering eingeschätzt. Hier setzen die Einflüsse der optischen Abbildung deutliche Grenzen.

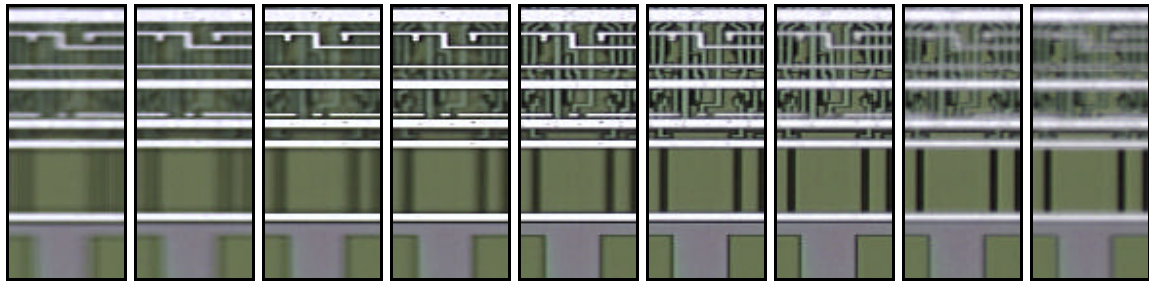


Abb. 4: Lichtmikroskopische Fokusserei einer Waferstruktur
(Mit freundlicher Genehmigung der Jenoptik Infab)

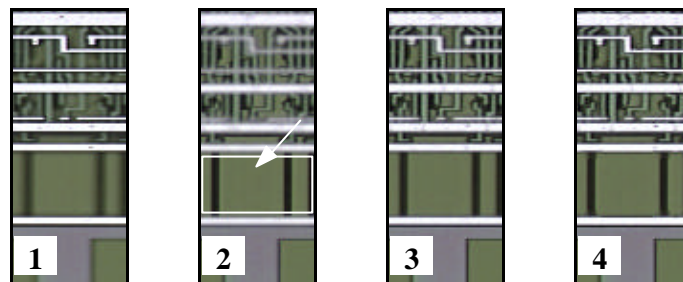


Abb. 5: Ergebnisse der Algorithmen zur fokussierten Bildauswahl (Bilder 1-3)
und zur orts aufgelösten Fokussuche (synthetisches Bild hoher Schärfentiefe) (Bild 4)

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Auswertung von lichtmikroskopischen Fokussereien zur optimalen Fokussierung und zur Gewinnung von 3d-Informationen,
R. Nestler, Diplomarbeit, TU-Ilmenau Fak. F. Elektrotechnik, ZBS e.V., 1997
Die Arbeit beinhaltet eine ausführliche Übersicht von Literaturquellen zu allen Teilabschnitten.
- [2] Eignung von Fokusverfahren für die Beobachtung und Vermessung von Mikrostrukturen, G. Rönneberg, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TH Darmstadt, gekürzte Form in: F&M Nr.: 104 (10), S.: 715-720, 1996
- [3] Depth from focusing and defocusing, Y. Xiong; A. S. Shafer, CMU Robotics Institute,
Quelle: <http://www.cs.cmu.edu/Reports/robotics.html>, gekürzte Form in: Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition 1993 und Proceedings of Image Understanding Workshop 1993

Autorenangaben:

Dipl.-Ing. R. Nestler (rico@zbs-ilmenau.de)
Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V./Technische Universität Ilmenau
Dipl.-Ing. L. Jacob (lutz@zbs-ilmenau.de)
Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.
Ehrenbergstraße 11
98693 Ilmenau
Tel.: 03677/668 486
Fax.: 03677/668 464
Internet: www.zbs-ilmenau.de