

Mikroskopie in Forschung und Praxis

Horst Robenek

GIT VERLAG

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------------|---|----|
| | Vorwort | 11 |
| Kapitel 1 | Lichtmikroskopie | |
| | D. Gerlach | |
| 1.1. | Einleitung | 13 |
| 1.1.1. | Licht-Modelle..... | 13 |
| 1.1.2. | Sammellinsen..... | 13 |
| 1.1.3. | Mikroskope..... | 15 |
| 1.2. | Optische Teile im abbildenden Teil des Mikroskopes | 17 |
| 1.2.1. | Objektive..... | 17 |
| 1.2.1.1. | Güteklassen der Objektive..... | 17 |
| 1.2.1.2. | Kenndaten für Objektive..... | 21 |
| 1.2.1.2.1. | Maßstabszahl..... | 21 |
| 1.2.1.2.2. | Numerische Apertur und Deckglasdicke..... | 21 |
| 1.2.1.2.2.1. | Trockenobjektive..... | 21 |
| 1.2.1.2.2.2. | Immersionsobjektive..... | 24 |
| 1.2.1.2.3. | Mechanische Tubuslänge..... | 26 |
| 1.2.1.3. | Abgleichlänge..... | 27 |
| 1.2.1.4. | Objektive mit Federfassung..... | 27 |
| 1.2.2. | Okulare..... | 27 |
| 1.2.2.1. | Vergrößerung des Zwischenbildes..... | 27 |
| 1.2.2.2. | Förderliche Vergrößerung..... | 28 |
| 1.2.2.3. | Brillenträgerokulare und Austrittspupille..... | 29 |
| 1.2.2.4. | Okulare zur Korrektion von Bildfehlern..... | 29 |
| 1.2.2.5. | Begrenzung des Gesichtsfeldes durch das Okular..... | 30 |
| 1.2.2.6. | Längenmessungen mit dem Mikroskop..... | 31 |
| 1.2.2.7. | Eichung eines Meßokulars..... | 31 |
| 1.2.2.8. | Verwendung eines Okulars als Lupe..... | 32 |
| 1.3. | Optische Teile im beleuchtenden Teil des Mikroskopes | 32 |
| 1.3.1. | Lichtquelle..... | 32 |
| 1.3.1.1. | Beleuchtung des Präparates mit einem Spiegel..... | 32 |
| 1.3.1.2. | Eingebaute künstliche Lichtquellen..... | 32 |
| 1.3.1.2.1. | Glühlampen..... | 32 |
| 1.3.1.2.2. | Niedervolt-Glühlampen..... | 32 |
| 1.3.2. | Kollektivlinsensystem..... | 33 |
| 1.3.3. | Kondensator..... | 33 |
| 1.3.3.1. | Einstellen der Kondensiorblende..... | 34 |
| 1.3.3.2. | Immersionskondensoren..... | 34 |
| 1.4. | Beleuchtung des Präparates | 35 |
| 1.4.1. | Kritische Beleuchtung..... | 36 |
| 1.4.2. | Köhlersche Beleuchtung..... | 36 |

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 1.4.2.1. | Einstellen der Köhlerschen Beleuchtung..... | 37 |
| 1.4.2.2. | Vorteile der Köhlerschen Beleuchtung..... | 37 |
| 1.5. | Bildentstehung im Mikroskop und Beugung | 39 |
| 1.5.1. | Beugungserscheinungen im Mikroskop..... | 39 |
| 1.5.2. | Bedeutung der Beugungserscheinungen für die Bildentstehung im Mikroskop..... | 41 |
| 1.5.3. | Auflösung im Mikroskop..... | 43 |
| 1.6. | Kontrast | 44 |
| 1.6.1. | Amplitudenobjekte..... | 44 |
| 1.6.2. | Phasenobjekte..... | 45 |
| 1.6.2.1. | Schließen der Kondensorblende..... | 46 |
| 1.6.2.2. | Schiefe Beleuchtung..... | 47 |
| 1.6.2.3. | Hoffmannscher Modulationskontrast..... | 47 |
| 1.6.2.4. | Dunkelfeldmikroskopie..... | 48 |
| 1.6.2.4.1. | Hellfeldkondensator mit Zentralblende..... | 48 |
| 1.6.2.4.2. | Spiegelkondensoren für die Dunkelfeldmikroskopie..... | 49 |
| 1.6.2.4.2.1. | Einstellen eines Trockendunkelfeldkondensors..... | 50 |
| 1.6.2.4.2.2. | Immersionsdunkelfeldkondensoren..... | 50 |
| 1.6.2.4.3. | Eigenschaften des Dunkelfeldbildes..... | 51 |
| 1.6.2.5. | Phasenkontrastmikroskopie..... | 51 |
| 1.6.2.5.1. | Grundlagen..... | 51 |
| 1.6.2.5.2. | Ausrüstung für die Phasenkontrastmikroskopie..... | 52 |
| 1.6.2.5.3. | Einstellen einer Phasenkontrasteinrichtung..... | 53 |
| 1.6.2.5.4. | Besonderheiten des Phasenkontrastbildes..... | 54 |
| 1.6.2.6. | Polarisationsmikroskop..... | 55 |
| 1.6.2.6.1. | Natürliches und polarisiertes Licht..... | 55 |
| 1.6.2.6.2. | Polarisationsmikroskopie..... | 57 |
| 1.6.2.6.2.1. | Doppelbrechung..... | 57 |
| 1.6.2.6.2.2. | Differentieller Interferenzkontrast..... | 62 |
| 1.6.2.6.2.2.1. | Einstellen des Differentiellen Interferenzkontrastes..... | 64 |
| 1.6.2.6.2.2.2. | Amplitudenkontrast..... | 65 |
| 1.6.2.7. | Vergleich von Hellfeld, Dunkelfeld, Phasenkontrast und Differentiellem Interferenzkontrast..... | 65 |
| 1.6.3. | Reflexionskontrast..... | 66 |
| 1.6.4. | Fluoreszenzmikroskopie..... | 68 |
| 1.6.4.1. | Fluoreszenz..... | 68 |
| 1.6.4.2. | Grundsätzlicher Aufbau eines Fluoreszenzmikroskopes..... | 69 |
| 1.6.4.3. | Die Bestandteile eines Fluoreszenzmikroskopes..... | 71 |
| 1.6.4.3.1. | Lichtquelle..... | 71 |
| 1.6.4.3.1.1. | Quecksilberhöchstdrucklampen..... | 71 |
| 1.6.4.3.1.2. | Xenonbrenner..... | 73 |
| 1.6.4.3.1.3. | Halogenlampen..... | 73 |
| 1.6.4.3.2. | Filter..... | 73 |
| 1.6.4.3.3. | Objektive..... | 75 |
| 1.6.4.4. | Anwendungsmöglichkeiten eines Fluoreszenzmikroskopes..... | 75 |
| 1.6.4.5. | Kombination eines Fluoreszenzmikroskopes mit anderen Untersuchungsverfahren..... | 76 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 1.7. | Mikrophotometrie | 76 |
| 1.7.1. | Grundlagen der Photometrie | 76 |
| 1.7.2. | Ausrüstung für die Mikrophotometrie | 77 |
| 1.7.2.1. | Photomultiplier | 77 |
| 1.7.2.2. | Sonstige Ausrüstungen | 77 |
| 1.7.3. | Mikrophotometrische Messungen und ihre Auswertung | 78 |
| 1.7.4. | Fehler bei mikrophotometrischen Messungen | 79 |
| 1.8. | Das Mikroskopstativ | 80 |
| 1.8.1. | Aufrechte Mikroskope | 80 |
| 1.8.1.1. | Kursmikroskope | 80 |
| 1.8.1.2. | Labor-(Arbeits-) Mikroskope | 81 |
| 1.8.1.3. | Forschungsmikroskope | 81 |
| 1.8.1.4. | Tuben | 81 |
| 1.8.2. | Inversmikroskope (Umgekehrte Mikroskope) | 82 |
| 1.9. | Weiterführende Literatur | 84 |

Kapitel 2 Stereomikroskopie

R. Gieseler

| | | |
|-------------|--|-----|
| 2.1. | Entwicklung | 87 |
| 2.2. | Dreidimensionales Sehen und Sehschärfe | 88 |
| 2.2.1. | Räumliches Sehen | 88 |
| 2.2.2. | Sehschärfe oder Auflösungsvermögen | 90 |
| 2.2.3. | Zusammenwirken von dem 3-D-Sehen und der Stereomikroskopie | 91 |
| 2.3. | Grundlagen der Stereomikroskopie | 91 |
| 2.3.1. | Stereomikroskop nach GREENOUGH | 92 |
| 2.3.2. | Stereomikroskop mit gemeinsamem Hauptobjektiv | 94 |
| 2.4. | Vergößerung, Auflösung und Schärfentiefe | 94 |
| 2.4.1. | Bestimmung der Vergrößerung | 95 |
| 2.4.2. | Auflösungsvermögen | 95 |
| 2.4.3. | Förderliche Vergrößerung | 97 |
| 2.4.4. | Schärfentiefe | 97 |
| 2.4.5. | Größe des Sehfeldes | 98 |
| 2.5. | Linsensysteme und ihre Korrekektionsklassen | 99 |
| 2.5.1. | Sphärische Aberration | 99 |
| 2.5.2. | Chromatische Aberration | 99 |
| 2.5.3. | Chromatische Vergrößerungsdifferenz | 100 |
| 2.5.4. | Astigmatismus | 100 |
| 2.5.5. | Bildfeldwölbung | 100 |
| 2.5.6. | Verzeichnung | 100 |
| 2.6. | Gerätetechnischer Aufbau eines Stereomikroskopes | 101 |
| 2.6.1. | Objektive | 102 |
| 2.6.2. | Okulare | 103 |
| 2.6.3. | Vergrößerungswechsler | 104 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 2.6.4. | Mikroskopgehäuse, Triebkästen und Mikroskopträger..... | 104 |
| 2.6.5. | Tubuskonzept | 105 |
| 2.6.6. | Stative | 105 |
| 2.6.6.1. | Auflichtstative | 105 |
| 2.6.6.2. | Durchlichtstative..... | 106 |
| 2.6.6.3. | Tischeinsätze..... | 106 |
| 2.7. | Beleuchtung | 107 |
| 2.7.1. | Objekt und Beleuchtungsart..... | 107 |
| 2.7.2. | Methoden für Hellfeld- und Dunkelfeld-Beleuchtung und Polarisation..... | 109 |
| 2.7.2.1. | Hellfeld..... | 109 |
| 2.7.2.2. | Dunkelfeld..... | 109 |
| 2.7.2.3. | Beleuchtung mit polarisiertem Licht..... | 109 |
| 2.7.3. | Lichtquellen und Lampenhäuser..... | 110 |
| 2.7.3.1. | Separate Lampenhäuser..... | 110 |
| 2.7.3.2. | Eingebaute Lampen..... | 110 |
| 2.7.4. | Faseroptische Beleuchtungseinrichtungen..... | 111 |
| 2.7.4.1. | Beleuchtungs-Lichtleiter..... | 111 |
| 2.7.4.2. | Glasfaser-Ringlicht..... | 111 |
| 2.8. | Zubehör | 112 |
| 2.8.1. | Zeichentubus | 113 |
| 2.8.2. | Einrichtungen zum Mitbeobachten..... | 113 |
| 2.8.2.1. | Diskussionstabus..... | 113 |
| 2.8.2.2. | Mitbeobachtung im Baukastensystem mit Kleinbild, Film- und Videokameras..... | 113 |
| 2.8.3. | Ansatz für Auf- und Schrägsicht | 114 |
| 2.8.4. | Ansatz zum Ausrichten der optischen Achse..... | 114 |
| 2.9. | Dokumentation | 114 |
| 2.9.1. | Mikrophotographie | 114 |
| 2.9.1.1. | Mikrophotographische Einrichtungen..... | 116 |
| 2.9.1.2. | Festlegung der Belichtung mit Belichtungsmessern | 117 |
| 2.9.1.3. | Photoautomaten | 118 |
| 2.9.2. | Videotechnik | 118 |
| 2.9.2.1. | Videokameras | 118 |
| 2.9.2.2. | Videoprinter | 119 |
| 2.9.2.3. | Videorekorder | 119 |
| 2.9.3. | Dreidimensionale Darstellungen..... | 120 |
| 2.10. | Messungen | 121 |
| 2.11. | Sondergeräte | 121 |
| 2.11.1. | Kombistereomikroskop..... | 121 |
| 2.11.2. | Makroskop..... | 122 |
| 2.11.3. | Operationsmikroskop | 124 |
| 2.11.3.1. | Aufbau | 124 |
| 2.11.3.2. | Beleuchtung | 124 |
| 2.11.3.3. | Optische Komponenten | 125 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| 2.11.3.4. | Asepsis..... | 125 |
| 2.11.3.5. | Stativ..... | 126 |
| 2.11.3.6. | Zubehör..... | 126 |
| 2.12. | Literatur | 127 |

Kapitel 3 Transmissionselektronenmikroskopie

K. Zierold

| | | |
|-------------|--|------------|
| 3.1. | Einleitung | 129 |
| 3.2. | Physik und Technik der Transmissionselektronenmikroskopie | 129 |
| 3.2.1. | Funktion des Transmissionselektronenmikroskopes (TEM)..... | 130 |
| 3.2.1.1. | Elektronenoptik..... | 130 |
| 3.2.1.2. | Wechselwirkung des Elektronenstrahles mit dem Präparat..... | 135 |
| 3.2.1.3. | Bildregistrierung | 137 |
| 3.2.2. | Abbildende Elektronenmikroskopie | 139 |
| 3.2.2.1. | Der elektronenmikroskopische Kontrast | 139 |
| 3.2.2.2. | Holographie..... | 140 |
| 3.2.2.3. | Elektronenbeugung | 142 |
| 3.2.2.4. | Bildverarbeitung | 144 |
| 3.2.2.5. | Tomographie | 146 |
| 3.2.2.6. | Hochvoltelektronenmikroskopie (HVEM)..... | 146 |
| 3.2.3. | Analytische Elektronenmikroskopie..... | 147 |
| 3.2.3.1. | Rastertransmissionselektronenmikroskopie (STEM) | 147 |
| 3.2.3.2. | Röntgenmikroanalyse | 149 |
| 3.2.3.3. | Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS)..... | 150 |
| 3.2.3.4. | Energiefilterelektronenmikroskopie (EFTEM)..... | 152 |
| 3.3. | Präparation | 154 |
| 3.3.1. | Präparatträger | 155 |
| 3.3.2. | Chemische Präparationstechniken | 157 |
| 3.3.2.1. | Präparation von Plastikschnitten | 157 |
| 3.3.2.2. | Präparation von Biomolekülen | 160 |
| 3.3.3. | Kryopräparationstechniken..... | 160 |
| 3.3.3.1. | Kryofixierung..... | 161 |
| 3.3.3.2. | Gefrierbruch-Replika-Technik..... | 163 |
| 3.3.3.3. | Vitrifizierte Suspensionen | 165 |
| 3.3.3.4. | Kryoultramikrotomie | 166 |
| 3.3.3.5. | Tieftemperatur-Entwässerung und Einbettung..... | 167 |
| 3.3.4. | Zytochemie | 169 |
| 3.3.4.1. | Fällungstechniken..... | 170 |
| 3.3.4.2. | Autoradiographie | 170 |
| 3.3.4.3. | Affinitätszytochemie und Immunmarkierung | 171 |
| 3.4. | Grenzen und Ausblicke | 175 |
| 3.4.1. | Strahlenschaden | 175 |
| 3.4.2. | Perspektiven der Elektronenmikroskopie in Biologie und Medizin | 177 |
| 3.5. | Literatur | 179 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| Kapitel 4 | Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenmikroanalyse | |
| | R. Reichelt | |
| 4.1. | Einführung | 185 |
| 4.2. | Rasterelektronenmikroskopie: Physikalische und instrumentelle Grundlagen | 186 |
| 4.2.1. | Wechselwirkung der Elektronen mit der Materie | 186 |
| 4.2.1.1. | Elastische und unelastische Streuung | 186 |
| 4.2.1.2. | Sekundärelektronen | 189 |
| 4.2.1.3. | Rückgestreute Elektronen | 191 |
| 4.2.1.4. | Kathodolumineszenz-Strahlung | 192 |
| 4.2.1.5. | Röntgenstrahlung | 193 |
| 4.2.2. | Konventionelle Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenmikroanalyse | 194 |
| 4.2.2.1. | Rasterelektronenmikroskopie | 194 |
| 4.2.2.2. | Röntgenmikroanalyse und Elementkartierung | 199 |
| 4.2.3. | Hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie | 201 |
| 4.2.3.1. | Rasterelektronenmikroskopie bei konventionellen Beschleunigungsspannungen | 201 |
| 4.2.3.2. | Niederspannungs-Rasterelektronenmikroskopie | 203 |
| 4.2.4. | Rasterelektronenmikroskopie an feuchten Proben | 206 |
| 4.2.5. | Rastertransmissionselektronenmikroskopie | 209 |
| 4.3. | Präparative Verfahren in der Rasterelektronenmikroskopie | 210 |
| 4.3.1. | Dehydratation biologischer Objekte | 211 |
| 4.3.2. | Erhöhung der Leitfähigkeit und Stabilität biologischer Objekte | 211 |
| 4.3.3. | Immunmarkierung | 212 |
| 4.4. | Kurzer Ausblick auf methodische Aspekte | 212 |
| 4.5. | Literatur | 213 |
| | | |
| Kapitel 5 | Konfokale Laserscanning Mikroskopie | |
| | J. Engelhardt und W. Knebel | |
| 5.1. | Einführung | 219 |
| 5.2. | Historischer Abriss der Konfokalmikroskopie | 220 |
| 5.3. | Konfokalität | 221 |
| 5.3.1. | Was ist Konfokalität? | 221 |
| 5.3.2. | Konsequenzen aus der Konfokalität | 222 |
| 5.3.3. | Wo sind die Grenzen der konfokalen Optik? | 223 |
| 5.3.4. | Realisierungsmöglichkeiten konfokaler Anordnungen | 224 |
| 5.3.5. | Scanverfahren | 226 |
| 5.4. | Anwendungen der konfokalen Mikroskopie | 228 |
| 5.4.1. | Reflexionsabbildungen | 228 |
| 5.4.2. | Simultane Fluoreszenzdetektion | 229 |
| 5.4.3. | Untersuchungen an lebenden Zellen | 230 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.4.4. | Quantitative Konfokalmikroskopie und 3-dimensionale Bildverarbeitung | 230 |
| 5.5. | Zusammenfassung und Ausblick | 231 |
| 5.6. | Literatur | 232 |

Kapitel 6 Rastersondenmikroskopie

M. Amrein

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.1. | Einführung | 233 |
| 6.2. | Grundlagen und instrumentelle Aspekte der Rastersondenmikroskopien | 234 |
| 6.2.1. | Das lokale Experiment | 234 |
| 6.2.2. | Rastereinheit | 235 |
| 6.2.3. | Auflösung | 236 |
| 6.2.4. | Probenpräparation | 237 |
| 6.3. | Das Rastertunnelmikroskop | 240 |
| 6.3.1. | Tunnelstrom | 240 |
| 6.3.2. | Instrumentelle Aspekte und Abbildungsarten der STM | 241 |
| 6.3.3. | STM in der makromolekularen, biologischen Strukturforschung | 241 |
| 6.4. | Das Rasterkraftmikroskop | 243 |
| 6.4.1. | Kräfte in der SFM | 243 |
| 6.4.2. | Instrumentelle Aspekte und Abbildungsarten der SFM | 345 |
| 6.4.3. | SFM in der biologischen Anwendung | 248 |
| 6.5. | Optische Nahfeldmikroskopie | 250 |
| 6.5.1. | Licht und Materie in der SNOM | 250 |
| 6.5.2. | Instrumentelle Aspekte und Abbildungsarten in der SNOM | 251 |
| 6.5.2.1. | Verschiedene SNOM | 251 |
| 6.5.2.2. | Sonden | 252 |
| 6.5.2.3. | Abstandsregelung | 253 |
| 6.5.3. | Anwendungen in der Biologie | 254 |
| 6.6. | Zusammenfassung und Ausblick | 254 |
| 6.7. | Dank | 256 |
| 6.8. | Literatur | 256 |

Kapitel 7 Akustische Mikroskopie

J. Bereiter-Hahn

| | | |
|--------|---|-----|
| 7.1. | Was dürfen wir von der akustischen Mikroskopie erwarten? | 261 |
| 7.2. | Basales über Ultraschall | 262 |
| 7.2.1. | Eigenschaften von Schallwellen | 263 |
| 7.2.2. | Schalldämpfung | 267 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| 7.3. | Prinzipien der Verwirklichung akustischer Mikroskopie | 270 |
| 7.3.1. | Das Scanning-Laser-Akustomikroskop (SLAM) | 270 |
| 7.3.2. | Das Scanning-Akustomikroskop (SAM) | 271 |
| 7.3.2.1. | Technische Realisierung eines SAM..... | 273 |
| 7.3.2.1.1. | Scanner..... | 275 |
| 7.3.2.1.2. | Grundzüge der elektronischen Schaltkreise | 276 |
| 7.3.2.1.3. | Bildspeicherung..... | 277 |
| 7.3.2.1.4. | Verbindung von SAM und Lichtmikroskop | 278 |
| 7.3.2.2. | Bildentstehung im SAM | 278 |
| 7.3.2.2.1. | Kontrast im SAM | 278 |
| 7.3.2.2.1.1. | Amplitudenkontrast | 279 |
| 7.3.2.2.1.2. | Beugungskontrast..... | 279 |
| 7.3.2.2.1.3. | Phasen-Kontrast | 279 |
| 7.3.2.2.1.4. | V(z) Kontrast | 279 |
| 7.3.2.2.1.5. | Interferenzkontrast..... | 282 |
| 7.3.2.2.2. | Optische (akustische) Übertragungsfunktion..... | 282 |
| 7.3.2.3. | Auflösungsvermögen des SAM..... | 284 |
| 7.3.2.3.1. | Laterale Auflösung | 284 |
| 7.3.2.3.2. | Einfluß der Kopplungsflüssigkeit auf das Auflösungsvermögen und Nicht-Linearitätsphänomene | 286 |
| 7.3.2.3.3. | Auflösung in z-Richtung | 288 |
| 7.3.2.3.4. | Penetrationstiefe von SAM, Abbildung von Strukturen unter der Oberfläche | 289 |
| 7.3.2.3.5. | Phasendetektion zur Verbesserung von Auflösung in z-Richtung..... | 290 |
| 7.3.2.3.6. | Zeitaufgelöste Ultraschallmikroskopie | 290 |
| 7.3.2.4. | Bildinterpretation | 293 |
| 7.3.2.4.1. | Iterative Analyse von Interferenzen bei positiver Defokussierung | 294 |
| 7.3.2.4.2. | Beispiel für eine „Mikro V(z)“ Methode..... | 297 |
| 7.3.2.5. | Non-Invasivität (Schädigung des Objektes)..... | 299 |
| 7.3.2.6. | Präparative Voraussetzungen für SAM..... | 300 |
| 7.3.2.7. | Einfluß der Unterlage auf die Objektabbildung: Herstellung verschiedener Oberflächen | 300 |
| 7.3.2.8. | Mechanische Fixierung der Präparate | 303 |
| 7.4. | Einfluß der Fixierung auf die akustischen Parameter von Zellen und Geweben | 304 |
| 7.5. | Vergleich mit lichtmikroskopischen Methoden | 306 |
| 7.6. | Anwendungsmöglichkeiten in Biologie und Medizin | 308 |
| 7.6.1. | Lebende Einzelzellen..... | 308 |
| 7.6.1.1. | Darstellung von Einzelzellen und von Zellen in Kultur..... | 308 |
| 7.6.1.2. | Qualitative Darstellung der Elastizitätsverteilung durch bildanalytische Verfahren..... | 310 |
| 7.6.1.3. | Darstellung zellulärer Bewegungsvorgänge mit SAM..... | 311 |
| 7.6.1.4. | Volumenbestimmung..... | 312 |
| 7.6.2. | Darstellung botanischer Objekte | 312 |
| 7.6.3. | Anwendungen in der Histologie..... | 313 |
| 7.6.4. | Ausblick..... | 316 |

| | | |
|------|------------------------|-----|
| 7.7. | Dank | 316 |
| 7.8. | Anhang | 317 |
| 7.9. | Literatur | 319 |

Kapitel 8 Automatische Bildanalyse

S. Eins und K. J. Stiller

| | | |
|-------------|---|-----|
| 8.1. | Einleitung | 325 |
| 8.1.1. | Ein Bild sagt mehr als tausend Worte | 326 |
| 8.1.2. | Abgrenzungen und Begriffsbestimmungen | 327 |
| 8.1.3. | Die Entwicklung seit 1950 | 328 |
| 8.2. | Meßverfahren | 332 |
| 8.2.1. | Visuelle Methoden | 332 |
| 8.2.2. | Teilautomatische Methoden | 334 |
| 8.2.3. | Automatische Methoden | 337 |
| 8.3. | Vorbereitung der Bildanalyse | 339 |
| 8.3.1. | Objektpräparation | 339 |
| 8.3.2. | Bildentstehung | 342 |
| 8.3.3. | Eichung | 345 |
| 8.4. | Das Graubild | 348 |
| 8.4.1. | Graubildverarbeitung | 349 |
| 8.4.1.1. | Pixeloperationen | 350 |
| 8.4.1.2. | Lokale Operationen | 355 |
| 8.4.2. | Spezielle Algorithmen | 357 |
| 8.4.2.1. | Ein heuristisches Programmierwerkzeug | 358 |
| 8.4.2.2. | Die schnelle Fourier-Transformation | 360 |
| 8.4.3. | Messungen am Graubild | 362 |
| 8.4.3.1. | Das Grauwerthistogramm | 362 |
| 8.4.3.2. | Grauwertkartierungen | 363 |
| 8.5 | Das Binärbild | 365 |
| 8.5.1. | Segmentierung | 365 |
| 8.5.1.1. | Grauschwellen | 365 |
| 8.5.1.2. | Andere Segmentierungen | 368 |
| 8.5.1.3. | Einige Bemerkungen zur Farbbildverarbeitung | 369 |
| 8.5.2. | Binärbildverarbeitung | 370 |
| 8.5.2.1. | Logische Bildverknüpfungen (Boolesche Operatoren) | 370 |
| 8.5.2.2. | Morphologische Operationen | 371 |
| 8.5.2.3. | Spezielle Algorithmen | 373 |
| 8.5.3. | Weitere Verarbeitungen | 373 |
| 8.5.3.1. | Geometrische Transformationen | 373 |
| 8.5.3.2. | Interaktive Operationen | 375 |
| 8.5.3.3. | Dreidimensionale Rekonstruktion | 375 |
| 8.6. | Messungen | 378 |

| | | |
|------------------|--|-----|
| 8.6.1. | <i>Objekte und Felder</i> | 379 |
| 8.6.1.1. | <i>Feldmessungen und klassische stereologische Verfahren</i> | 379 |
| 8.6.1.2. | <i>Objektmessungen und moderne stereologische Verfahren</i> | 381 |
| 8.6.1.3. | <i>Densitometrie von Objekten und Phasen</i> | 384 |
| 8.7. | Anwendungen der automatischen Bildanalyse | 384 |
| 8.8. | Schlußbetrachtung | 386 |
| 8.9. | Literatur | 389 |
| Kapitel 9 | Index | 393 |