

Inhaltsverzeichnis

A. Untersuchungsmethoden

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 1. Elektronenoptische Grundlagen des Durchstrahlungsmikroskopes | 1 |
| 1.1. Elektronenstrahlerzeugung | 1 |
| 1.1.1. Elektronenaustritt in das Vakuum | 1 |
| 1.1.2. Die Beschleunigung der Elektronen zwischen Kathode und Anode | 2 |
| 1.1.3. Die Haarnadelkathode | 4 |
| 1.1.4. Einfluß der Form des Wehneltzylinders auf den Richtstrahlwert | 6 |
| 1.1.5. Spitzen- und Oxydkathoden | 9 |
| 1.1.6. Die Energieverteilung der Elektronen. | 12 |
| 1.2. Elektronenlinsen | 13 |
| 1.2.1. Elektrostatische Linsen | 13 |
| 1.2.2. Magnetische Linsen | 17 |
| 1.2.3. Permanentmagnetische Linsen. | 23 |
| 1.3. Bildfehler | 24 |
| 1.3.1. Öffnungsfehler | 25 |
| 1.3.2. Verzeichnung | 28 |
| 1.3.3. Axialer Astigmatismus | 29 |
| 1.3.4. Farbfehler | 32 |
| 1.3.5. Beugungsfehler | 35 |
| 1.3.6. Theoretisches Auflösungsvermögen | 36 |
| Literatur zu § 1 | 38 |
| § 2. Prinzipieller Aufbau des Durchstrahlungsmikroskopes | 42 |
| 2.1. Das Beleuchtungssystem | 42 |
| 2.2. Das Abbildungssystem | 45 |
| 2.3. Objekthalterungen für spezielle Untersuchungen | 48 |
| Literatur zu § 2 | 51 |
| § 3. Andere Abbildungsverfahren | 54 |
| 3.1. Reflexionsmikroskopie | 54 |
| 3.2. Emissionsmikroskopie. | 56 |
| 3.3. Auflichtmikroskopie | 60 |
| 3.4. Rastermikroskopie und Röntgen-Mikroanalyse | 61 |
| Literatur zu § 3 | 63 |
| § 4. Messung wichtiger optischer Konstanten | 66 |
| 4.1. Vergrößerungsbestimmung | 66 |
| 4.2. Messung und Korrektur des Astigmatismus | 69 |
| 4.3. Testen des Auflösungsvermögens | 78 |
| 4.4. Messung von Aperturwinkeln | 82 |
| Literatur zu § 4 | 83 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 5. Elektronenbeugung | 85 |
| 5.1. Kristallographische Grundlagen | 85 |
| 5.1.1. Bravais'sches Translationsgitter und Netzebenen | 85 |
| 5.1.2. Das reziproke Gitter | 90 |
| 5.2. Theorie der Elektronenbeugung in Kristallen | 91 |
| 5.2.1. Materiewellenlänge der Elektronen | 91 |
| 5.2.2. Laue-Gleichungen und Bragg'sche Reflexionsbedingung | 92 |
| 5.2.3. Kinematische Theorie der Elektronenbeugung | 96 |
| 5.2.4. Dynamische Theorie der Elektronenbeugung | 101 |
| 5.2.5. Intensität der Debye-Scherrer-Ringe | 109 |
| 5.2.6. Kikuchi-Diagramme | 112 |
| 5.3. Die optischen Grundlagen der Elektronenbeugung im Elektronen- mikroskop | 114 |
| 5.3.1. Beugung mit Kondensor | 114 |
| 5.3.2. Beugung mit Zwischenabbildung und Feinbereichsbeugung | 115 |
| 5.3.3. Spezielle Elektronenbeugungsverfahren | 121 |
| 5.4. Auswertung und Informationsmöglichkeiten der Elektronen- Beugungsdiagramme | 124 |
| 5.4.1. Ermittlung der Netzebenenabstände | 124 |
| 5.4.2. Indizierung der Netzebenen und Strukturbestimmung | 126 |
| 5.4.3. Auswertung von Texturdiagrammen | 128 |
| 5.4.4. Zusatzreflexe in Beugungsdiagrammen | 130 |
| 5.4.5. Beugungsdiagramme amorpher Stoffe | 135 |
| 5.4.6. Orientierungsbestimmung aus Elektronen-Beugungsdi- agrammen | 136 |
| Literatur zu § 5 | 139 |
| § 6. Bildkontrast in amorphen Objekten | 143 |
| 6.1. Übersicht der Wechselwirkung Elektron-Objekt | 143 |
| 6.2. Klassische Theorie der Streuung (Rutherford'sche Näherung) | 145 |
| 6.3. Intensitätsverteilung der elastischen Streuung (Born'sche Näherung) | 148 |
| 6.4. Unelastische Streuung | 150 |
| 6.4.1. Intensitätsverteilung der unelastischen Streuung | 150 |
| 6.4.2. Methoden zur Messung von Energieverlusten | 152 |
| 6.4.3. Größe und Gesetzmäßigkeiten der Energieverluste | 156 |
| 6.5. Bildkontrast durch Streuabsorption | 160 |
| 6.6. Unterschied des Kontrastes in amorphen und kristallinen Schichten | 167 |
| Literatur zu § 6 | 170 |
| § 7. Phasenkontrast und verwandte Probleme | 174 |
| 7.1. Elektronenoptischer Brechungsindex und inneres Potential | 174 |
| 7.2. Elektronen-Interferometer | 176 |
| 7.3. Phasenkontrast | 179 |
| 7.4. Zonenplatten nach HOPPE und LENZ | 187 |
| Literatur zu § 7 | 189 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 8. Bildkontrast in kristallinen Objekten | 191 |
| 8.1. Hell- und Dunkelfeldabbildungen kristalliner Objekte | 191 |
| 8.2. Kontrast in kristallinen Objekten | 195 |
| 8.3. Abbildung von Kristallbaufehlern | 199 |
| 8.3.1. Kontrast von Versetzungen | 200 |
| 8.3.2. Ermittlung des Burgersvektors von Versetzungen | 207 |
| 8.3.3. Stapelfehler | 209 |
| 8.3.4. Andere Kristallbaufehler | 215 |
| 8.4. Moiré-Effekt | 215 |
| Literatur zu § 8 | 220 |
| § 9. Präparatveränderungen unter Elektronenbestrahlung. | 223 |
| 9.1. Objekterwärmung | 223 |
| 9.1.1. Methoden zur Ermittlung der Objekttemperatur | 223 |
| 9.1.2. Betrag der in Wärme umgesetzten Energieverluste | 226 |
| 9.1.3. Theorie der Objekterwärmung | 228 |
| 9.2. Strahlenschädigung der Objekte | 231 |
| 9.2.1. Strahlenschäden in organischen Substanzen | 231 |
| 9.2.2. Strahlenschäden in anorganischen Kristallen. | 237 |
| 9.3. Kontamination | 239 |
| Literatur zu § 9 | 242 |
| § 10. Bildaufzeichnung und Intensitätsmessungen. | 245 |
| 10.1. Leuchtschirme | 245 |
| 10.2. Bildverstärker | 248 |
| 10.3. Photographische Schichten | 248 |
| 10.3.1. Theoretische Grundlagen | 248 |
| 10.3.2. Eigenschaften einiger kommerzieller Photo-Emulsionen | 254 |
| 10.3.3. Versuche einer hochauflösenden Bildaufzeichnung | 256 |
| 10.3.4. Belichtungskontrolle | 258 |
| 10.4. Intensitätsmeßmethoden | 259 |
| Literatur zu § 10 | 261 |
| § 11. Ermittlung der dritten Dimension von elektronenmikroskopischen Präparaten | 262 |
| 11.1. Schrägbeschattung | 262 |
| 11.2. Stereoabbildungen | 265 |
| 11.3. Quantitative Kontrastmessungen | 271 |
| 11.4. Wägungsmethode nach BAHR und ZEITLER. | 275 |
| Literatur zu § 11 | 277 |
| § 12. Abbildung magnetischer und elektrischer Objektfelder | 278 |
| 12.1. Abbildung magnetischer Bereichsstrukturen | 278 |
| 12.2. Abbildung elektrostatischer Objektfelder | 282 |
| Literatur zu § 12 | 284 |

B. Präparationsmethoden

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 13. Objektblenden und Trägernetze | 286 |
| 13.1. Objektblenden | 286 |
| 13.2. Trägernetze | 287 |
| 13.3. Reinigung von Objekt- und Aperturblenden aus Edelmetallen | 288 |
| 13.4. Aufbewahrung, Transport und Handhabung von Präparatträgern | 290 |
| § 14. Grundlagen der Hochvakuum- und Aufdampftechnik | 292 |
| 14.1. Aufbau von Bedampfungsanlagen | 292 |
| 14.2. Hochvakuumverdampfung | 295 |
| 14.2.1. Verdampfungsquellen | 295 |
| 14.2.2. Verdampfung von Siliziummonoxyd | 298 |
| 14.2.3. Kohleverdampfung | 299 |
| 14.2.4. Verdampfung durch Elektronenstoßheizung | 302 |
| 14.2.5. Herstellung von Platin-Kohle-Mischschichten | 303 |
| 14.3. Schichten aus der Kathodenzerstäubung und Glimmentladung | 305 |
| 14.4. Möglichkeiten zur Schichtdickenbestimmung von Aufdampfschichten | 308 |
| 14.5. Schrägbeschattung | 312 |
| 14.5.1. Schräg-, Portrait- und Kegelbedampfung | 312 |
| 14.5.2. Optimale Dicke von Beschattungsfilmen | 314 |
| 14.5.3. Herstellung und Eigenstruktur der Beschattungsfilme | 315 |
| Literatur zu § 14 | 318 |
| § 15. Herstellung und Eigenschaften von Trägerfolien | 320 |
| 15.1. Kollodiumfilme | 320 |
| 15.2. Formvarfilme | 322 |
| 15.3. SiO-Filme | 326 |
| 15.4. Kohlefilme | 326 |
| 15.4.1. Kohleschichten als Verstärkung für organische Folien und Schnitte | 326 |
| 15.4.2. Doppelfolien | 327 |
| 15.4.3. Reine Kohlefolien | 328 |
| 15.5. Aluminiumoxyd- und andere Trägerfilme | 329 |
| 15.6. Herstellung von Netz- und Lochfolien | 330 |
| Literatur zu § 15 | 331 |
| § 16. Oberflächenabdrücke | 333 |
| 16.1. Filmabdrücke | 333 |
| 16.1.1. Organische Filmabdrücke | 334 |
| 16.1.2. Filmabdrücke mit SiO oder Kohle | 336 |
| 16.1.3. Elektrolytisch niedergeschlagene Filmabdrücke (Epitaxie- Abdrücke) | 339 |
| 16.1.4. Oxydabdrücke | 341 |
| 16.1.5. Extraktionsabdrücke | 344 |
| 16.1.6. Dekorationsabdrücke | 345 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.2. Matrizenabdrücke | 347 |
| 16.2.1. Matrizen durch Eintrocknen von Lösungen | 347 |
| 16.2.2. Matrizen aus Kunststoff-Folien | 350 |
| 16.2.3. Polymerisationsmatrizen | 353 |
| 16.2.4. Metall-Matrizen | 354 |
| 16.2.5. Nachbehandlung von Matrizenabdrücken | 354 |
| 16.3. Hüllabdrücke | 357 |
| 16.4. Auflösungsvermögen von Oberflächenabdrücken | 360 |
| 16.5. Zielpräparation von Oberflächenabdrücken | 364 |
| Literatur zu § 16 | 370 |
| § 17. Herstellung durchstrahlbarer Folien aus Metallen und anderen Kristallen | 375 |
| 17.1. Mechanische Verfahren | 375 |
| 17.1.1. Walzen und Hämmern | 375 |
| 17.1.2. Spalten | 375 |
| 17.1.3. Ultramikrotomie | 375 |
| 17.2. Chemische Ätzung | 376 |
| 17.3. Ionenätzung | 377 |
| 17.4. Elektrolytisches Polieren | 378 |
| 17.4.1. Allgemeine Grundlagen | 378 |
| 17.4.2. Methoden für Metallfolien | 380 |
| 17.4.3. Herstellung durchstrahlbarer Folien aus kompaktem Material | 388 |
| 17.5. Durchstrahlbare Schichten durch Kristallwachstum | 391 |
| Literatur zu § 17 | 392 |
| § 18. Präparation von Pulvern, Suspensionen, Stäuben und Aerosolen | 395 |
| 18.1. Pulverförmige Substanzen | 395 |
| 18.1.1. Aufstäubung | 396 |
| 18.1.2. Eintrocknen einer Suspension | 397 |
| 18.1.3. Anrühren mit einem Bindemittel | 397 |
| 18.1.4. Ultramikrotomie eingebetteter Pulver | 398 |
| 18.2. Suspensionen und Kolloide | 398 |
| 18.2.1. Eintrocknungsmethode | 398 |
| 18.2.2. Zerstäubungsmethoden | 400 |
| 18.3. Stäube und Aerosole | 402 |
| 18.3.1. Thermische Abscheidung | 403 |
| 18.3.2. Elektrische Abscheidung | 405 |
| 18.3.3. Membranfilter | 407 |
| 18.3.4. Ermittlung der Tropfengröße flüssiger Aerosole | 408 |
| Literatur zu § 18 | 409 |
| § 19. Gewebefixation | 410 |
| 19.1. Allgemeine Grundlagen | 410 |
| 19.1.1. Postmortale Veränderungen | 410 |
| 19.1.2. Entnahme von Gewebeproben | 412 |
| 19.1.3. Kriterien für die Erhaltung der sublichtmikroskopischen Struktur | 413 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 19.2. Osmiumfixation | 415 |
| 19.2.1. Zusammensetzung der Fixationsgemische | 415 |
| 19.2.2. Einfluß des pH-Wertes, der Isotonie und der Zusammen- setzung der Fixationsflüssigkeit | 418 |
| 19.2.3. Chemischer Ablauf der Osmiumfixation | 429 |
| 19.2.4. Dauer der Osmiumfixation | 431 |
| 19.3. Kalium-Permanganat-Fixation | 432 |
| 19.4. Aldehyd-Fixation | 434 |
| 19.4.1. Formaldehyd | 434 |
| 19.4.2. Höhere Aldehyde | 435 |
| 19.4.3. Kontrast von aldehydfixierten Geweben | 437 |
| 19.5. Gefrierfixationsmethoden | 438 |
| 19.5.1. Allgemeine Grundlagen zum Gefrierprozeß | 438 |
| 19.5.2. Gefriertrocknung | 443 |
| 19.5.3. Gefriersubstitution | 445 |
| 19.5.4. Gefrierätzung | 446 |
| Literatur zu § 19 | 449 |
| § 20. Kontrastierung und histochemische Methoden | 453 |
| 20.1. Abgrenzung zwischen Fixierung, Kontrastierung und histochemi- schen Nachweismethoden | 453 |
| 20.2. Bleikontrastierung | 455 |
| 20.3. Andere Kontrastierungsmittel | 459 |
| 20.4. Spezifische Kontrastierungen | 461 |
| 20.5. Elektronenmikroskopische Darstellung der Enzymsatzorte | 465 |
| 20.6. Immunoferritin-Methode | 471 |
| Literatur zu § 20 | 474 |
| § 21. Einbettung | 479 |
| 21.1. Entwässerung | 479 |
| 21.2. Methacrylateinbettung | 482 |
| 21.2.1. Zur Chemie der Methacrylat-Polymerisation | 482 |
| 21.2.2. Der Einbettungsprozeß | 483 |
| 21.2.3. Vermeidung von Einbettungsartefakten | 486 |
| 21.3. Epoxydharze | 488 |
| 21.3.1. Araldit | 488 |
| 21.3.2. Epon | 490 |
| 21.3.3. Maraglas | 491 |
| 21.4. Polyester (speziell Vestopal W) | 492 |
| 21.5. Wasserlösliche Einbettungsmittel | 492 |
| 21.5.1. Gelatine-Einbettung | 493 |
| 21.5.2. Aquoneinbettung | 493 |
| 21.5.3. X 133/2097 (Durcupan) | 494 |
| 21.5.4. Glykolpharmacrylate (GMA) | 494 |
| 21.5.5. Polyampholyte | 495 |
| 21.6. Orientiertes und gezieltes Einbetten | 496 |
| Literatur zu § 21 | 498 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 22. Ultramikrotomie | 501 |
| 22.1. Prinzipielle Wirkungsweise des Ultramikrotomes | 501 |
| 22.2. Herstellung der Schneiden | 506 |
| 22.3. Vorbereitung der Präparate zum Schneiden | 509 |
| 22.4. Bemerkungen zum Schneidprozeß | 511 |
| 22.5. Auffangen der Schnitte | 513 |
| 22.6. Veränderungen der Schnitte unter Elektronenbeschuß. | 517 |
| 22.7. Möglichkeiten der Schnittdickenbestimmung | 519 |
| 22.8. Lichtmikroskopische Vergleichsschnitte und ihre Färbung | 522 |
| Literatur zu § 22 | 524 |
| § 23. Präparation organischer Teilchen (Fraktionen, Homogenisate, Bakterien, Phagen und Viren) | 527 |
| 23.1. Präparation von Kulturen | 527 |
| 23.1.1. Bakterienkulturen | 527 |
| 23.1.2. Gewebekulturen | 529 |
| 23.2. Isolation und Fragmentation | 530 |
| 23.2.1. Isolation von Phagen und Viren | 530 |
| 23.2.2. Fragmentation von Bakterien | 530 |
| 23.2.3. Isolierte Zellbestandteile (Homogenisate) | 532 |
| 23.3. Präparation von Suspensionen | 533 |
| 23.3.1. Eintrocknen eines Tropfens auf einer Trägerfolie | 533 |
| 23.3.2. Spreiten in einer Monolage | 535 |
| 23.3.3. Quantitative Verfahren zur Teilchenzählung in Sus- pensionen. | 537 |
| 23.3.4. Gefriertrocknung und Kritische-Punkt-Methode | 539 |
| 23.3.5. Nachbehandlungen der Eintrocknungen (insbesondere Pseu- doabdrücke) | 542 |
| 23.4. Negativkontrastierung | 544 |
| 23.4.1. Kontrastentstehung und Strukturhaltung | 544 |
| 23.4.2. Präparationsverfahren | 547 |
| Literatur zu § 23 | 551 |
| § 24. Autoradiographie | 556 |
| 24.1. Vorteile und Auflösungsvermögen der elektronenmikroskopischen Autoradiographie. | 556 |
| 24.2. Eigenschaften der radioaktiven Isotope und ihrer Träger | 560 |
| 24.3. Präparation der Emulsionen | 561 |
| 24.4. Entwicklung der Emulsionen | 564 |
| Literatur zu § 24 | 567 |
| § 25. Monographien über Elektronenmikroskopie | 568 |
| § 26. Bezugsquellen-Nachweis | 570 |
| Namenverzeichnis | 574 |
| Sachverzeichnis | 590 |