

# Inhalt

Danksagung . . . . .	11
Vorwort und Einführung . . . . .	15

## I     Von der Strahlenoptik zum einfachen Mikroskop . . . 19

1     Optische Grundlagen – Strahlenoptik . . . . .	20
1.1   Was ist Licht? – Ein historischer Überblick . . . . .	20
1.2   Lichtquellen: Selbst- und Nichtselbstleuchter . . . . .	26
1.2.1   Wie entsteht Licht? . . . . .	26
1.3   Begriffe der Strahlenoptik . . . . .	27
1.3.1   Lichtstrahl und Strahlenbündel . . . . .	27
1.3.2   Punktlichtquellen zur einfachen grafischen Darstellung von Strahlengängen. . . . .	28
1.4   Axiome der Strahlenoptik . . . . .	29
1.4.1   Erstes Axiom der Strahlenoptik . . . . .	30
1.4.2   Zweites Axiom der Strahlenoptik . . . . .	30
1.4.3   Drittes Axiom der Strahlenoptik . . . . .	36
1.4.4   Viertes Axiom der Strahlenoptik . . . . .	36
1.5   Brechung des Lichts beim Durchgang durch verschiedene optische Bauelemente . . . . .	37
1.5.1   Planparallele Platte . . . . .	37
1.5.2   Brechung an kugelförmigen Grenzflächen . . . . .	38
1.5.3   Brechung an Linsen . . . . .	40
1.6   Wie entstehen Bilder? . . . . .	45
1.6.1   Abbildungen durch Linsen . . . . .	45
1.6.2   Abbildungen durch Prismen . . . . .	55
1.6.3   Abbildungen durch Spiegel . . . . .	57
1.7   Zusammenfassung . . . . .	58

<b>2</b>	<b>Auge, Lupe und einfaches Mikroskop</b>	59
2.1	Das Auge	59
2.1.1	Der Aufbau des menschlichen Auges	59
2.1.2	Netzhaut	60
2.1.3	Dioptrik des Auges	62
2.2	Optische Instrumente und Vergrößerung	72
2.2.1	Lupe	73
2.2.2	Vergrößerungsglas, Lupe und einfaches Mikroskop	75
2.3	Zusammenfassung	80
<b>II</b>	<b>Das zusammengesetzte Mikroskop</b>	81
<b>3</b>	<b>Allgemeines zum Mikroskop</b>	82
3.1	Der Strahlengang eines Mikroskops	82
3.2	Die Vergrößerung durch das Mikroskop	85
3.3	Das zusammengesetzte und das einfache Mikroskop im Vergleich	89
3.4	Zusammenfassung	91
<b>4</b>	<b>Der Aufbau eines Mikroskops</b>	92
4.1	Allgemeiner Aufbau eines Mikroskops	92
4.2	Die mechanischen Bestandteile eines Mikroskops	92
4.2.1	Stative	92
4.2.2	Mikroskoptuben	96
4.2.3	Objektische	100
4.3	Zusammenfassung	103
<b>5</b>	<b>Mikroskopobjektive</b>	104
5.1	Objektive mit endlicher und unendlicher Bildweite	104
5.1.1	Objektive mit endlicher Bildweite	104
5.1.2	Objektive mit unendlicher Bildweite	106
5.2	Vergrößerung und Abbildungsmaßstab	107
5.3	Die numerische Apertur	110
5.3.1	Bedeutung der numerischen Apertur	111
5.3.2	Numerische Apertur und Öffnungswinkel	112
5.3.3	Numerische Apertur und Immersion	113
5.4	Homogene Immersion	114
5.5	Immersionsmittel und -objektive	116
5.5.1	Immersionsmittel	116
5.5.2	Anwendung eines Immersionsobjektivs	118
5.6	Numerische Apertur und förderliche Vergrößerung	119
5.7	Abbildungsfehler und deren Korrektion	120
5.7.1	Abbildungsfehler	120
5.7.2	Monochromatische Aberrationen	120

---

5.7.3	Chromatische Aberration . . . . .	124
5.8	Korrektionsklassen oder Objektivklassen . . . . .	125
5.8.1	Der Achromat . . . . .	125
5.8.2	Fluoritobjektive oder Semiapochromate . . . . .	127
5.8.3	Der Apochromat . . . . .	127
5.8.4	Planobjektive . . . . .	129
5.9	Spezialobjektive . . . . .	130
5.9.1	Objektive mit Quarzglas . . . . .	130
5.9.2	Phasenkontrastobjektive . . . . .	131
5.9.3	Objektive für die Polarisationsmikroskopie . . . . .	131
5.10	Deckglasdicke . . . . .	131
5.11	Korrektionsring bei Objektiven . . . . .	133
5.12	Federfassung zum Schutz der Frontlinse . . . . .	133
5.13	Objektive mit Irisblende . . . . .	134
5.14	Zusammenfassung . . . . .	136
<b>6</b>	<b>Mikroskopokulare . . . . .</b>	<b>137</b>
6.1	Allgemeines zum Okular . . . . .	137
6.2	Okulartypen . . . . .	141
6.3	Okularangaben und ihre Bedeutung . . . . .	144
6.3.1	Vergrößerung . . . . .	144
6.3.2	Sehfeldzahl . . . . .	144
6.3.3	Großfeld- oder Weitwinkelokulare . . . . .	147
6.3.4	Dioptrienausgleich . . . . .	147
6.3.5	Brillenträgerokular . . . . .	147
6.4	Okulare für Demonstrations-, Zähl- oder Messzwecke . . . . .	148
6.5	Zusammenfassung . . . . .	152
<b>7</b>	<b>Die Beleuchtungseinrichtung eines Mikroskops . . . . .</b>	<b>153</b>
7.1	Die Beleuchtung . . . . .	153
7.2	Lichtquellen und ihre optimale Einstellung . . . . .	154
7.3	Der Kondensor . . . . .	155
7.3.1	Allgemeiner Aufbau eines Kondensors . . . . .	155
7.3.2	Funktion des Kondensors: Ausleuchtung des Präparats . . . . .	155
7.3.3	Funktion des Kondensors: Beleuchtungsapertur . . . . .	157
7.3.4	Einstellung der Kondensorblende . . . . .	158
7.3.5	Bauformen von Kondensoren . . . . .	161
7.4	Mikroskopbeleuchtungen . . . . .	163
7.4.1	Die kritische Beleuchtung . . . . .	163
7.4.2	Die Köhlersche Beleuchtung . . . . .	164
7.5	Zusammenfassung . . . . .	174

<b>8</b>	<b>Einteilung der Mikroskope</b>	175
8.1	Kurstmikroskope	175
8.2	Routine- oder Labormikroskope	178
8.3	Forschungsmikroskope oder Universalmikroskope	178
8.4	Zusammenfassung	180
<b>9</b>	<b>Stereomikroskope und Makroskope</b>	181
9.1	Stereomikroskope	181
9.1.1	Greenough-Systeme oder Greenough-Mikroskope	183
9.1.2	Teleskop- oder Fernrohrsysteme	184
9.1.3	Beleuchtung	185
9.1.4	Anwendungsgebiete	185
9.2	Makroskope	186
9.3	Zusammenfassung	187
<b>III</b>	<b>Theorie der mikroskopischen Abbildung</b>	189
<b>10</b>	<b>Grundlagen der Wellenoptik</b>	190
10.1	Der dunkle Raum: Warum die Wellenoptik zum Verständnis des Mikroskops so bedeutend ist	190
10.2	Optische Beugung und Interferenz	194
10.3	Schwingungen	198
10.4	Wellen	199
10.4.1	Mathematische Beschreibung von Wellen	201
10.4.2	Wasserwellen als Modell für Transversalwellen	203
10.4.3	Ausbreitung von Lichtwellen	204
10.5	Interferenz von Wellen	205
10.5.1	Wasserwellen	205
10.5.2	Lichtwellen	206
10.6	Modelle zur Lichtwellenausbreitung: Huygens-Fresnelsches Prinzip und Fresnelsche Beugung	209
10.7	Fresnelsche und Fraunhofersche Beugungen	218
10.8	Zusammenfassung	220
<b>11</b>	<b>Beugung im Mikroskop</b>	221
11.1	Beobachtung von Beugungsbildern	222
11.1.1	Die Beugung von Licht in der Fraunhofer-Versuchsanordnung	222
11.1.2	Die Beugung von Licht im Abbeschen Diffraktionsapparat	223
11.1.3	Möglichkeiten zur Beobachtung des primären Beugungsbildes im normalen, aufrechten Mikroskop	224
11.2	Einfachspalt, Doppelspalt und optische Gitter	225
11.2.1	Die Beugung von Licht am Einfachspalt	226
11.2.2	Beugung am Doppelspalt und am Strichgitter	230

---

11.2.3	Kreuzgitter . . . . .	234
11.3	Mikroskopische Präparate als Beugungsgitter . . . . .	236
11.4	Bedeutung der Lichtbeugung für die Bildentstehung: Ausblenden der Nebenmaxima . . . . .	237
11.5	Zusammenfassung . . . . .	239
<b>12</b>	<b>Die Theorie der Bildentstehung nach Abbe . . . . .</b>	<b>240</b>
12.1	Die Abbesche Theorie der mikroskopischen Abbildung . .	241
12.2	Auflösungsvermögen eines Mikroskops nach Abbe . . . .	244
12.3	Abbe-Formel für das Auflösungsvermögen eines Mikroskops . . . . .	249
12.4	Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops (Abbe-Limit) . . . .	252
12.5	Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops nach von Helmholtz . . . . .	254
12.6	Auflösungsvermögen und förderliche Vergrößerung . . . .	254
12.7	Theorie der mikroskopischen Abbildung nach Abbe und der dunkle Raum . . . . .	258
12.8	Ausblick . . . . .	258
12.9	Zusammenfassung . . . . .	259
<b>IV</b>	<b>Elektronenmikroskopische Verfahren . . . . .</b>	<b>261</b>
<b>13</b>	<b>Das Transmissionselektronenmikroskop . . . . .</b>	<b>262</b>
13.1	Elektronen zur Abbildung von Strukturen prägen die Vorstellungswelt der Biologen . . . . .	263
13.2	Die Geschichte der Elektronenmikroskopie beginnt mit dem Transmissionselektronenmikroskop . . .	266
13.3	Aufbau und Funktionsweise eines Transmissionselektronenmikroskops . . . . .	274
13.4	Korrektoren zur Minimierung von Linsenfehlern im TEM .	279
13.5	Bildentstehung im TEM . . . . .	281
13.6	Möglichkeiten eines Energiefilters im TEM . . . . .	284
13.7	Probenpräparation für TEM . . . . .	289
13.7.1	Objektträger für Untersuchungen im TEM . . . . .	291
13.7.2	Präparation von Einzelpartikeln für TEM . . . . .	292
13.7.3	Gibt es eine ideale Fixierungsmethode? . . . . .	293
13.7.4	Herstellung von Proben-Dünnschnitten . . . . .	296
13.7.5	Kontrastierung der Proben . . . . .	298
13.7.6	Probenpräparation für analytische EFTEM-Methoden .	298
13.8	TEM-Anwendungen in den Lebenswissenschaften . . . .	298
13.8.1	Visualisierung von Ultrastrukturen und subzellulärer Lokalisation von Molekülen im TEM . . .	298
13.8.2	Analyse von biologischen Proben durch Kryo-TEM . . .	299
13.8.3	Einsatz des TEM in der Strukturbioologie . . . . .	300

13.8.4 3D im TEM – TEM-Tomographie . . . . .	301
13.9 Die Interpretation von TEM Aufnahmen . . . . .	303
13.10 Limits und Trends in der Transmissionselektronenmikroskopie . . . . .	304
13.11 Zusammenfassung . . . . .	305
<b>14 Das Rasterelektronenmikroskop . . . . .</b>	<b>307</b>
14.1 Rasterelektronenmikroskopie – Fortsetzungsreise ins Reich der kleinen Dinge . . . . .	307
14.1.1 Allgemeines Funktionsprinzip des REM . . . . .	308
14.1.2 Die Geschichte der Rasterelektronenmikroskopie . . . . .	308
14.2 Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops . . . . .	313
14.2.1 Elektronenstrahlerzeugende Systeme und Elektronenemitter . . . . .	313
14.2.2 Linsen . . . . .	322
14.2.3 Rastereinheit . . . . .	326
14.3 Bildentstehung im REM: Wechselwirkungen zwischen Elektronenstrahl und Probe und ihr Informationsgehalt . . . . .	328
14.4 Detektion und Kontraste . . . . .	337
14.4.1 Everhart-Thornley-Detektor (ETD) . . . . .	338
14.4.2 Dedizierte RückstreuElektronendetektoren . . . . .	341
14.4.3 Spezielle Detektoren und Abbildungsverfahren . . . . .	343
14.4.4 Die Bedeutung von Kontrast, Signal und Rauschen . . . . .	348
14.5 Wie kommt man zu einem guten Bild? – Probenpräparation und Einstellungen am REM . . . . .	350
14.6 Trends in der Rasterelektronenmikroskopie . . . . .	354
14.7 Zusammenfassung . . . . .	357
Literaturverzeichnis . . . . .	359
Kapitel 1–12 . . . . .	359
Kapitel 13 . . . . .	365
Kapitel 14 . . . . .	368
Anhang . . . . .	371
Symbole und Konstanten . . . . .	371
Grundgrößen und abgeleitete Größen . . . . .	372
Brechungssindizes wichtiger Immersionsmittel und Luft . . . . .	372
Formeln . . . . .	373
Konventionen . . . . .	374
Quellennachweis . . . . .	375
Tabellen . . . . .	375
Abbildungen . . . . .	375
Sachverzeichnis . . . . .	381
Autorenverzeichnis . . . . .	396