

Inhalt

Vorwort	1
Inhalt	5
1 Wozu dieser Aufwand?	9
1.1 Das Problem mit der Vergrößerung	9
1.2 Das Auflösungsvermögen	10
1.3 Elektronenwellen	14
1.4 Die Bedeutung der Vergrößerung	16
2 Was wir über Elektronenoptik und den Aufbau eines Elektronenmikroskops wissen sollten	19
2.1 Das Prinzip der mehrstufigen Abbildung	19
2.2 Rotationssymmetrische magnetische Felder als Elektronenlinsen	20
2.3 Abbildungsfehler	24
2.4 Auflösungsvermögen mit Berücksichtigung des Öffnungsfehlers	28
2.5 Die Elektronenkanone	29
2.6 Der Richtstrahlwert	33
2.7 Wir bauen ein Elektronenmikroskop	36
2.7.1 Das Beleuchtungssystem	37
2.7.2 Das Abbildungssystem	38
2.7.3 Die Probenbühne	39
2.7.4 Die Registrierung des Bildes	41
2.7.5 Das Vakuumsystem	43
2.7.6 Sonstiges	47
3 Wir präparieren elektronentransparente Proben	49
3.1 Wo liegt das Problem?	49
3.2 „Klassische“ Methoden	51
3.3 Schneiden, Schleifen und Ionendünnen	55
3.4 Focused Ion Beam („FIB“) Techniken	60
4 Wir beginnen mit der praktischen Arbeit	65
4.1 Was wir „am Rande“ benötigen	66
4.2 Wir bauen die Probe in den Halter und schleusen diesen ins Mikroskop	67
4.3 Wir überprüfen den (Justage)-Zustand des Mikroskops	69
4.4 Scharfstellen des Bildes – Schärfe und Kontrast	77
4.5 Kontamination und Objektschädigung	78

5	Wir schalten um auf Elektronenbeugung	83
5.1	Wieso Beugungsreflexe?	83
5.2	Kristallgitter und Netzebenen	86
5.3	Feinbereichs- und Feinstrahlbeugung	94
5.4	Was können wir aus Feinbereichs-Beugungsmustern lernen?	99
5.4.1	Radien in Ringdiagrammen	100
5.4.2	Auslöschungsregeln	102
5.4.3	Intensitäten der Beugungsreflexe	107
5.4.4	Positionen der Beugungsreflexe in Punktdiagrammen	108
5.4.5	Indizierung der Beugungsreflexe	110
5.5	Kikuchi- und HOLZ-Linien	114
5.6	Amorphe Proben	118
6	Warum sehen wir Kontraste im Bild?	121
6.1	Elastische Streuung der Elektronen in der Probe	121
6.2	Streuabsorptions- und Beugungscontrast	123
6.3	Hell- und Dunkelfeldabbildung	126
6.4	Biegekonturen, Versetzungen und semikohärente Ausscheidungen	129
6.5	Dickenkonturen, Stapelfehler und Zwillinge	135
6.6	Moiré-Muster	139
6.7	Magnetische Domänen: Lorentzmikroskopie	140
7	Wir erhöhen die Vergrößerung	145
7.1	Abbildung von Atomsäulen in Kristallgittern: Phasencontrast	145
7.2	Contrastübertragung durch die Objektivlinse	150
7.3	Wellenoptische Deutung des Auflösungsvermögens	153
7.4	Periodische Helligkeitsverteilung in Bildern: Fourieranalyse	155
7.5	Streuabsorptions- und Phasencontrast	158
7.6	Contrast bei amorphen Proben	160
7.7	Korrektur des Astigmatismus	163
7.8	Messung des Auflösungsvermögens	164
7.9	Korrektur von Öffnungs- und Farbfehler	166
7.10	Interpretation hochaufgelöster Bilder	169
8	Wir schalten um auf Rastertransmissionselektronenmikroskopie	171
8.1	Was ändert sich elektronenoptisch?	171
8.2	Auflösungsvermögen oder: Wie klein kann die Elektronensonde werden?	173
8.3	Contrast im rastertransmissionselektronenmikroskopischen Bild	178
8.4	Spezialfall: Weitwinkel-Dunkelfeld-Ringdetektor	181

9	Wir nutzen die analytischen Möglichkeiten	183
9.1	Analytische Signale als Folge inelastischer Wechselwirkung	183
9.1.1	Emission von Röntgenstrahlung	183
9.1.2	Energieverluste der Primärelektronen	188
9.2	Energiedispersive Spektroskopie charakteristischer Röntgenstrahlung („EDXS“)	192
9.2.1	Röntgenspektrometer und Röntgenspektren	192
9.2.2	Qualitative Interpretation der Röntgenspektren	197
9.2.3	Quantifizierung von Röntgenspektren	201
9.2.4	Linienprofile und Elementverteilungsbilder	209
9.3	Elektronenenergieverlust-Spektroskopie („EELS“)	211
9.3.1	Elektronenenergie-Spektrometer	211
9.3.2	Low-Loss und Core-Loss Bereich der Spektren	212
9.3.3	Qualitative Elementanalyse	215
9.3.4	Untergrund und Vielfachstreuung: Anforderungen an die Probe	217
9.3.5	Messung der Probendicke	219
9.3.6	Kantenfeinstruktur: Bindungsanalyse	222
9.3.7	Quantifizierung von Energieverlust-Spektren	225
9.4	Energiegefilterte Abbildung	227
9.5	Vergleich zwischen EDXS und EELS	231
10	Grundlagen genauer erklärt (etwas mehr Mathematik)	233
10.1	Beugung an einer Kante (Huygenssches Prinzip)	233
10.2	Wellenfunktion für Elektronen	234
10.3	Elektronenwellenlänge relativistisch berechnet	239
10.4	Elektronenbahnen in rotationssymmetrischen magnetischen Feldern	241
10.5	Auflösungsvermögen mit Berücksichtigung des Öffnungsfehlers	251
10.6	Schottky-Effekt	252
10.7	Elektrisches Potential in rotationssymmetrischen Elektrodenanordnungen	254
10.8	Laue-Gleichungen und reziprokes Gitter, Ewald-Konstruktion	258
10.9	Kinematisches Modell: Gitterfaktor und Strukturfaktor	270
10.10	Debye-Streuung	278
10.11	Elektronen im Feld einer Zentralkraft	282
10.12	Mittlere freie Weglänge für elastische Streuung	288
10.13	Abstände in Moiré-Mustern	290
10.14	Kontrastübertragungsfunktion	293
10.15	Scherzer-Fokus	302
10.16	Delokalisation	306
10.17	Potential in elektrostatischen Multipolen	310
10.18	Elektronensonde und Abbildungsfehler	313
10.19	Klassischer inelastischer Stoß	319

10.20	Effizienz von energiedispersiven Röntgendetektoren	321
10.21	Berechnung von Cliff-Lorimer-k-Faktoren	327
10.22	Absorptionskorrektur bei EDXS	332
10.23	Prismen für Elektronen	335
10.24	Faltung von Funktionen	339
	Resümee und Ausblick	343
	Physikalische Konstanten	345
	Abkürzungsverzeichnis	347
	Literaturhinweise	351
	Quellenverzeichnis	355
	Sachwortverzeichnis	363