

Inhaltsverzeichnis

1	Wozu dieser Aufwand?	1
1.1	Das Problem mit der Vergrößerung	1
1.2	Das Auflösungsvermögen	2
1.3	Elektronenwellen	6
1.4	Die Bedeutung der Vergrößerung	9
1.5	Was nutzt das analytische TEM in der Praxis?	10
	Literatur	12
2	Was wir über den Aufbau eines Elektronenmikroskops und Elektronenoptik wissen sollten	13
2.1	Das Prinzip der mehrstufigen Abbildung	13
2.2	Rotationssymmetrische magnetische Felder als Elektronenlinsen	15
2.3	Abbildungsfehler	18
2.4	Auflösungsvermögen mit Berücksichtigung des Öffnungsfehlers	22
2.5	Die Elektronenkanone	23
2.6	Der Richtstrahlwert	28
2.7	Wir bauen ein Elektronenmikroskop	30
2.7.1	Das Beleuchtungssystem	31
2.7.2	Das Abbildungssystem	32
2.7.3	Die Probenbühne	34
2.7.4	Die Registrierung des Bildes	36
2.7.5	Das Vakuumsystem	38
2.7.6	Sonstiges	42
	Literatur	44
3	Wir präparieren elektronentransparente Proben	45
3.1	Wo liegt das Problem?	45
3.2	„Klassische“ Methoden	47
3.3	Schneiden, Schleifen und Ionendünnen	52
3.4	Focused Ion Beam (FIB) Techniken	56
3.4.1	Querschnittslamellen für TEM	58
3.4.2	Verbesserung der Qualität der FIB-Lamellen	60

3.5	Bemerkung zur Präparation magnetischer Proben.	63
	Literatur.	64
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.	68
4.3	Wir überprüfen den (Justage-)Zustand des Mikroskops.	69
4.3.1	Justage der Blende im 2. Kondensor („C2-Blende“)	70
4.3.2	Justage der Elektronenkanone.	71
4.3.3	Einstellen der euzentrischen Höhe.	73
4.3.4	Einstellen der Umlenkpunkte für die Strahlkipfung.	75
4.3.5	Justage des Rotationszentrums.	77
4.4	Scharfstellen des Bildes – Schärfe und Kontrast.	78
4.5	Kontamination und Objektschädigung.	79
	Literatur.	83
5	Wir schalten um auf Elektronenbeugung.	85
5.1	Wieso Beugungsreflexe?	85
5.2	Kristallgitter und Netzebenen.	89
5.3	Feinbereichs- und Feinstrahlbeugung.	97
5.4	Was können wir aus den Feinbereichs-Beugungsmustern lernen?	102
5.4.1	Radien in Ringdiagrammen.	102
5.4.2	Auslöschungsregeln.	104
5.4.3	Intensitäten der Beugungsreflexe.	108
5.4.4	Positionen der Beugungsreflexe in Punktdiagrammen.	110
5.4.5	Indizierung der Beugungsreflexe.	111
5.4.6	Doppelbeugung.	116
5.5	Kikuchi- und HOLZ-Linien.	118
5.6	Amorphe Proben.	123
5.7	Übersicht über Elektronenbeugungsmethoden.	125
	Literatur.	126
6	Warum sehen wir Kontraste im Bild?	129
6.1	Elastische Streuung der Elektronen in der Probe.	129
6.2	Streuabsorptions- und Beugungskontrast.	131
6.3	Hell- und Dunkelfeldabbildung.	134
6.4	Was können wir aus Beugungskontrasten lernen?	138
6.4.1	Biegekonturen, Versetzungen und semikohärente Ausscheidungen.	138
6.4.2	Dickenkonturen, Stapelfehler und Zwillinge.	144

6.5	Moiré-Muster	148
6.6	Magnetische Domänen: Lorentzmikroskopie	150
	Literatur.	153
7	Wir erhöhen die Vergrößerung	155
7.1	Abbildung von Atomsäulen in Kristallgittern: Phasenkontrast	155
7.2	Kontrastübertragung durch die Objektivlinse	161
7.3	Wellenoptische Deutung des Auflösungsvermögens	163
7.4	Periodische Helligkeitsverteilung in Bildern: Fourieranalyse	165
7.5	Streuabsorptions- und Phasenkontrast	168
7.6	Kontrast bei amorphen Proben.	170
7.7	Messung des Auflösungsvermögens	173
7.8	Korrektur der Abbildungsfehler	175
	7.8.1 Astigmatismus	175
	7.8.2 Öffnungsfehler (sphärische Aberration).	176
	7.8.3 Farbfehler (chromatische Aberration)	180
7.9	Öffnungsfehlerkorrektur in der Praxis	182
7.10	Interpretation hochaufgelöster Bilder	185
	Literatur.	186
8	Wir schalten um auf Rastertransmissions-elektronenmikroskopie . .	189
8.1	Was ändert sich elektronenoptisch?	190
8.2	Auflösungsvermögen oder: Wie klein kann die Elektronensonde werden?	192
8.3	Schärfe und Vergrößerung des STEM-Bildes	196
8.4	Kontrast im rastertransmissionselektronenmikroskopischen Bild.	197
8.5	Spezialfall: Weitwinkel-Dunkelfeld-Ringdetektor.	200
	Literatur.	201
9	Wir nutzen die analytischen Möglichkeiten	203
9.1	Analytische Signale als Folge inelastischer Wechselwirkung.	203
	9.1.1 Emission von Röntgenstrahlung	204
	9.1.2 Energieverluste der Elektronen	209
9.2	Energiedispersive Spektroskopie charakteristischer Röntgenstrahlung (EDXS).	212
	9.2.1 Röntgenspektren und Röntgenspektrometer	213
	9.2.2 Vergleich der Spektren von verschiedenen Detektoren	219
	9.2.3 Qualitative Interpretation der Röntgenspektren.	221
	9.2.4 Quantifizierung von Röntgenspektren	226
	9.2.5 Linienprofile und Elementverteilungsbilder	235

9.3	Elektronenenergieverlust-Spektroskopie (EELS)	238
9.3.1	Elektronenenergie-Spektrometer	238
9.3.2	Low-Loss- und Core-Loss-Bereich der Spektren	239
9.3.3	Qualitative Elementanalyse	242
9.3.4	Untergrund und Vielfachstreuung: Anforderungen an die Probe	244
9.3.5	Messung der Probendicke	246
9.3.6	Kantenfeinstruktur: Bindungsanalyse	248
9.3.7	Quantifizierung von Energieverlust-Spektren	252
9.4	Energiegefilterte Abbildung	254
9.5	Vergleich zwischen EDXS und EELS	257
	Literatur.	259
10	Grundlagen genauer erklärt (etwas mehr Mathematik).	261
10.1	Elektronenwellen	261
10.1.1	Wellenfunktion.	262
10.1.2	Elektronenwellenlänge relativistisch berechnet.	267
10.1.3	Beugung an einer Kante (Huygenssches Prinzip)	268
10.2	Elektronenbahnen in rotationssymmetrischen magnetischen Feldern	269
10.3	Rotationssymmetrische elektrische Felder.	277
10.3.1	Potential im Triodensystem	280
10.3.2	Potential bei der Feldemissionskathode.	280
10.3.3	Potential im Silizium-Drift-Detektor.	281
10.3.4	Schottky-Effekt	281
10.4	Elektrostatische Multipole	284
10.4.1	Potentialverteilungen	285
10.4.2	Elektronenbahnen.	287
10.5	Beugung und Streuung von Elektronen	291
10.5.1	Laue-Gleichungen und reziprokes Gitter, Ewald-Konstruktion	291
10.5.2	Kinematisches Modell: Gitterfaktor und Strukturfaktor	302
10.5.3	Debye-Streuung	310
10.5.4	Elektronen im Feld einer Zentralkraft	314
10.5.5	Mittlere freie Weglänge für elastische Streuung	318
10.5.6	Klassischer inelastischer Stoß	320
10.6	Elektronenoptische Abbildung	322
10.6.1	Auflösungsvermögen mit Berücksichtigung des Öffnungsfehlers	322
10.6.2	Abstände in Moiré-Mustern	323
10.6.3	Kontrastübertragungsfunktion	326
10.6.4	Scherzer-Fokus.	333
10.6.5	Delokalisation	336

10.7	Elektronensonde und Abbildungsfehler	339
10.8	EDXS: Berechnung von Cliff-Lorimer-k-Faktoren	344
10.8.1	Effizienz von energiedispersiven Röntgendetektoren	344
10.8.2	Ionisationswahrscheinlichkeit (bzw. -querschnitt) Q	350
10.8.3	Fluoreszenzausbeute ω	352
10.8.4	$K\alpha$ -Anteil an der K-Serie	353
10.8.5	Absorptionskorrektur bei EDXS	354
10.9	Prismen für Elektronen	357
10.9.1	Magnetisches Prisma	357
10.9.2	Elektrostatisches Prisma	359
10.10	Faltung von Funktionen	361
10.11	Fehlerbetrachtung bei elektronenmikroskopischen Messungen	363
	Literatur	371
	Resümee und Ausblick	373
	Physikalische Konstanten	377
	Literatur	379
	Stichwortverzeichnis	383