

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XI*

1 Einführung *1*

- 1.1 Nanowissenschaften und Nanotechnologie *1*
- 1.2 Nanowissenschaften sind interdisziplinär *3*
- 1.3 Nanotechnologie – Heilsbringer oder Risiko? *3*
- 1.4 Kohlenstoffnanostrukturen *4*
- 1.5 Der Aufbau dieses Buchs *5*
 - Literatur *7*

Teil I Nanotechnologie und Nanostrukturen *9*

2 Nanostrukturen *11*

- 2.1 Definition *11*
- 2.2 Physik und Chemie im Nanometerbereich *12*
 - 2.2.1 Der Einfluss der Oberfläche *13*
 - 2.2.2 Platzerparnis *14*
 - 2.2.3 Kritische Längen *16*
 - 2.2.4 Quantenmechanik *22*
- 2.3 Arten von Nanostrukturen *25*
- 2.4 Vorbilder in der Natur *31*
- 2.5 Wissen testen *34*
 - Literatur *35*

3 Herstellung von Nanostrukturen *37*

- 3.1 Grundlegende Ansätze zur Herstellung von Nanostrukturen *37*
- 3.2 Top-down-Verfahren *37*
 - 3.2.1 Erzeugung von Nanopartikeln durch Mahlen *39*
 - 3.2.2 Mechanische Oberflächenermüdung *40*
 - 3.2.3 Lithografie und Ätzen *41*
- 3.3 Irgendwo dazwischen: die weiche Lithografie *44*

3.3.1	Nanokontaktdruck	45
3.3.2	Weitere auf Stempeln beruhende Verfahren der weichen Lithografie	46
3.3.3	Dip-Pen-Nanolithografie	47
3.4	Bottom-up-Verfahren	48
3.4.1	Selbstassemblierte Systeme und Schichten	50
3.4.2	Verwendung von Templates	52
3.4.3	Verwendung von DNA	54
3.4.4	Prozessführung	55
3.5	Funktionalisierung	55
3.5.1	Möglichkeiten zur Funktionalisierung	56
3.5.2	Verleihung von Funktionalitäten	59
3.6	Wissen testen	62
	Literatur	62
4	Charakterisierung von Nanostrukturen	65
4.1	Kann man Atome sehen?	65
4.1.1	Das Rayleigh-Kriterium	65
4.1.2	Reduzierung der Wellenlänge elektromagnetischer Strahlung	66
4.1.3	Die Lösung: Teilchenstrahlen	67
4.2	Elektronenstrahlverfahren	68
4.2.1	SEM	68
4.2.2	TEM und HRTEM	70
4.2.3	TED und EELS	71
4.3	Charakterisierung mittels Nanosystemen:	
	Rastersondenmikroskopie	72
4.3.1	Rastertunnelmikroskopie	73
4.3.2	AFM	76
4.3.3	Weitere Verfahren	79
4.4	Makroskopische Verfahren	82
4.4.1	Raman-Spektroskopie	82
4.4.2	Weitere spektroskopische Verfahren	85
4.4.3	Verfahren zur Bestimmung der Zusammensetzung	85
4.4.4	Beugungsverfahren zur Ermittlung der Kristallinität	88
4.5	Wissen testen	90
	Literatur	90
	Teil II Das Element Kohlenstoff	93
5	Das Element Kohlenstoff	95
5.1	Vorkommen	95
5.1.1	Die Entstehung von Kohlenstoff	96
5.1.2	Bedeutung als Energieträger	97
5.1.3	Bedeutung in der Biologie	97

- 5.2 Die besondere Chemie des Kohlenstoffs 98
 - 5.2.1 Hybridisierung 98
 - 5.2.2 Ring- und Kettenbildung 100
 - 5.2.3 Polymere 103
 - 5.2.4 Fremdatome und funktionelle Gruppen 104
- 5.3 Wissen testen 107
 - Literatur 108

6 Kohlenstoffestkörpermodifikationen 109

- 6.1 Diamant 111
 - 6.1.1 Vorkommen und Herstellung 111
 - 6.1.2 Physikalische Eigenschaften 118
 - 6.1.3 Chemische Eigenschaften 121
 - 6.1.4 Anwendungen 121
- 6.2 Graphit 122
 - 6.2.1 Struktur 122
 - 6.2.2 Gewinnung bzw. Herstellung 123
 - 6.2.3 Physikalische Eigenschaften 123
 - 6.2.4 Chemische Eigenschaften 124
 - 6.2.5 Anwendungen 125
- 6.3 Weitere Modifikationen 127
 - 6.3.1 Glaskohlenstoff 127
 - 6.3.2 Ruß 128
 - 6.3.3 Amorpher Kohlenstoff 129
- 6.4 Wissen testen 130
 - Literatur 131

Teil III Kohlenstoff-Nanostrukturen 133

7 Punktförmige Kohlenstoffnanostrukturen: Fullerene 135

- 7.1 Entdeckung 135
- 7.2 Struktur 137
 - 7.2.1 Die große Varietät der Fullerene 137
 - 7.2.2 C_{60} und C_{70} 139
 - 7.2.3 Nomenklatur 140
- 7.3 Fullerite 140
- 7.4 Fullerene mit Fremdatomen 141
 - 7.4.1 Heterofullerene 141
 - 7.4.2 Endohedrale Komplexe 142
- 7.5 Herstellung 144
 - 7.5.1 Laserablation 144
 - 7.5.2 Thermische Zersetzung 144
 - 7.5.3 Vakuum-Bogenentladung 146
 - 7.5.4 Pyrolyse 146

7.5.5	Verbrennungsverfahren	147
7.5.6	Vergleich der Verfahren	147
7.6	Weiterverarbeitung	148
7.6.1	Reinigung und Anreicherung	148
7.6.2	Funktionalisierung	149
7.6.3	Polymerisation	150
7.7	Eigenschaften von Fullerenen	150
7.7.1	Chemische Eigenschaften	151
7.7.2	Mechanische Eigenschaften	151
7.7.3	Optische Eigenschaften	152
7.8	Anwendungen	152
7.8.1	Wasserstoffspeicherung	155
7.8.2	Härtung von Materialien	155
7.8.3	Medizin	155
7.9	Wissen testen	159
	Literatur	160
8	Eindimensionale Kohlenstoffnanostrukturen: Nanoröhrchen	163
8.1	Entdeckung	163
8.2	Beschreibung, Klassifizierung und Nomenklatur	164
8.2.1	Armchair-, Zigzag- und chirale Röhrchen	164
8.2.2	Singlewall- and Multiwall-Röhrchen	167
8.2.3	Die Enden der Nanoröhrchen	168
8.2.4	Spezielle Arten von CNTs	168
8.2.5	Nanoröhrchen mit Fremdatomen	170
8.2.6	Nanoröhrchen aus anderen Materialien	172
8.3	Herstellung	172
8.3.1	Physikalische Verfahren	172
8.3.2	CVD-Verfahren	173
8.3.3	Ein spezielles Beispiel: das HiPCO-Verfahren	177
8.3.4	Zusammenfassender Vergleich	178
8.3.5	Reinigung, Trennung und Aufbereitung	179
8.3.6	CNT-Bündel, -Fasern und -Filme	181
8.4	Eigenschaften	185
8.4.1	Mechanische Eigenschaften	186
8.4.2	Elektrische und elektronische Eigenschaften	186
8.4.3	Thermische Eigenschaften	187
8.4.4	Chemische Eigenschaften	188
8.5	Anwendungen	188
8.5.1	Nanoverbundwerkstoffe	189
8.5.2	Anwendungen in elektronischen Bauelementen	190
8.5.3	Feldemission	196
8.5.4	Sensoren	197
8.5.5	Anwendung von CNTs in der Medizin	198
8.5.6	Weitere Anwendungen	200

- 8.5.7 Gegenwärtige Probleme 200
- 8.6 Wissen testen 201
- Literatur 201

- 9 Zweidimensionale Kohlenstoffnanostrukturen: Graphen 205**
- 9.1 Entdeckung 205
- 9.2 Struktur 206
- 9.3 Herstellung 207
 - 9.3.1 Ablöseverfahren 208
 - 9.3.2 CVD-Verfahren 208
 - 9.3.3 Direktes epitaktisches Wachstum durch Segregation 209
 - 9.3.4 Transfer auf geeignete Substrate 210
 - 9.3.5 Graphenwachstum auf SiC 211
 - 9.3.6 Reduktion von Graphenoxid 212
- 9.4 Eigenschaften 214
 - 9.4.1 Mechanische Eigenschaften 215
 - 9.4.2 Elektrische und elektronische Eigenschaften 215
 - 9.4.3 Thermische Eigenschaften 216
 - 9.4.4 Optische Eigenschaften 216
 - 9.4.5 Chemische Eigenschaften 217
 - 9.4.6 Weitere Eigenschaften 217
- 9.5 Anwendungen 218
 - 9.5.1 Graphentransistor 218
 - 9.5.2 Chemische Sensoren und Biosensoren 219
 - 9.5.3 Nanoverbundwerkstoffe 221
- 9.6 Wissen testen 221
- Literatur 223

- 10 Dreidimensionale Kohlenstoffnanostrukturen 225**
- 10.1 Kohlenstoffnanozwiebeln 225
 - 10.1.1 Struktur 225
 - 10.1.2 Herstellung 227
 - 10.1.3 Eigenschaften 230
 - 10.1.4 Anwendungen 230
- 10.2 Kohlenstoffnanohörner 231
- 10.3 Weitere graphitische dreidimensionale Kohlenstoffnanostrukturen 234
- 10.4 Zusammenfassung: graphitähnliche dreidimensionale Kohlenstoffnanostrukturen 236
- 10.5 Diamantnanopartikel 236
 - 10.5.1 Herstellungsverfahren 237
 - 10.5.2 Struktur, Aufbereitung und Funktionalisierung 239
 - 10.5.3 Anwendungen 240
- 10.6 Nano- und ultrananokristalline Diamantschichten 240
- 10.7 Diamantnanosäulen und Nanostäbe 243
- 10.8 Wissen testen 243
- Literatur 244

11	Verwandte Nanostrukturen aus anderen Elementen	247
11.1	Bornitrid	247
11.1.1	Herstellung von BN	249
11.1.2	Eigenschaften von BN	249
11.1.3	BN-Nanostrukturen	250
11.1.4	BN-Nanoröhrchen	251
11.1.5	Weitere BN-Nanostrukturen	255
11.2	Silizium	260
11.2.1	Siliziumnanodrähte	261
11.2.2	Siliziumquantenpunkte	262
11.2.3	Mesoporöse SiO ₂ -Nanoteilchen	264
11.3	Wissen testen	265
	Literatur	266
	Richtig gelöst	269
	Stichwortverzeichnis	283