

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort *XI*

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
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

<b>2</b>	<b>Nanostrukturen</b>	<b>11</b>
2.1	Definition	11
2.2	Physik und Chemie im Nanometerbereich	12
2.2.1	Der Einfluss der Oberfläche	13
2.2.2	Platzersparnis	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
<b>3</b>	<b>Herstellung von Nanostrukturen</b>	<b>37</b>
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
<b>4</b>	<b>Charakterisierung von Nanostrukturen</b>	<b>65</b>
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

<b>5</b>	<b>Das Element Kohlenstoff</b>	<b>95</b>
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

<b>6</b>	<b>Kohlenstoffestkörpermodifikationen</b>	<b>109</b>
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

<b>7</b>	<b>Punktförmige Kohlenstoffnanostrukturen: Fullerene</b>	<b>135</b>
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
<b>8</b>	<b>Eindimensionale Kohlenstoffnanostrukturen: Nanoröhrchen</b>	<b>163</b>
8.1	Entdeckung	163
8.2	Beschreibung, Klassifizierung und Nomenklatur	164
8.2.1	Armchair-, Zigzag- und chirale Röhrchen	164
8.2.2	Singlewall- und 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
<b>9</b>	<b>Zweidimensionale Kohlenstoffnanostrukturen: Graphen</b>	<b>205</b>
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
<b>10</b>	<b>Dreidimensionale Kohlenstoffnanostrukturen</b>	<b>225</b>
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	Diamantanopartikel	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	Diamantanosäulen 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  $\text{SiO}_2$ -Nanoteilchen 264

11.3 Wissen testen 265

Literatur 266

**Richtig gelöst 269**

**Stichwortverzeichnis 283**