

# Strategische Metalle – Eigenschaften, Anwendung und Recycling

Bernhard Adler

# Strategische Metalle – Eigenschaften, Anwendung und Recycling

 Springer Spektrum

Bernhard Adler  
Halle (Saale), Deutschland

ISBN 978-3-662-53035-1      ISBN 978-3-662-53036-8 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-53036-8

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck  
Lektorat und Satz: Grit Zacharias

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Germany  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Versorgungsbasis und Zukunftstechnologien .....</b>	<b>3</b>
2.1	Kritikalität .....	3
2.2	Rohstoffbasis aus Bergbau und Urban Mining .....	5
2.3	Zukunftstechnologien .....	9
2.4	Rohstoffpreise für Metalle .....	11
<b>3</b>	<b>Häufigkeiten und Eigenschaften der Metalle .....</b>	<b>15</b>
3.1	Häufigkeiten der Metall-Elemente in der Erdkruste .....	15
3.2	Klassifizierung der Metalle .....	16
3.3	Eigenschaften der Metalle .....	19
3.3.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften .....	19
3.3.2	Elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit .....	20
3.3.3	Optische Eigenschaften der Metalle .....	22
3.3.4	Magnetische Eigenschaften .....	25
3.3.5	Kristallstrukturen und Legierungsbildung .....	26
3.3.6	Eigenschaften von dünnen Schichten und Nanokörpern .....	27
3.3.7	Halbleitereffekte .....	29
3.3.8	Ausgewählte chemische Eigenschaften der Metalle .....	31
3.4	Toxizitäten der Industriemetalle .....	42
3.4.1	Toxizitätsmaße .....	43
3.4.2	Akute und chronische Toxizität .....	44
3.4.3	Gentoxizität .....	47
3.4.4	Ökotoxizität .....	48
3.4.5	Gefährdungspotenziale und Sicherheitshinweise .....	49
<b>4</b>	<b>Metallische Rohstoffe – Mineralien, Bergbau und Anreicherung .....</b>	<b>53</b>
4.1	Mineralien .....	53
4.2	Bergbau und Lagerstätten .....	56
4.3	Rohstoffanreicherungen .....	59
4.4	Rohstoffaufkommen und Fördermengen .....	59
<b>5</b>	<b>Applikationen Strategischer Metalle .....</b>	<b>63</b>
5.1	Keramik- und Glasmaterialien EA .....	63
5.1.1	Funktionskeramiken für elektrische Applikationen .....	64
5.1.2	Mischoxidkeramiken aus Zr und Y .....	65
5.1.3	Keramik- und Emaille-Pigmente .....	68
5.1.4	Poliermittel .....	70
5.2	Materialien für Laser- und Laserdioden .....	70
5.3	Leuchtstoffe .....	75
5.4	Photovoltaik .....	79
5.5	Bildschirme .....	82
5.6	Energiespeicher und Energiekonvertierungen .....	89

5.6.1	Stationäre H <sub>2</sub> -Speicher .....	91
5.6.2	Mobile elektrische Speicher .....	92
5.7	Legierungen.....	97
5.7.1	Legierungen der Seltenen Erdmetalle .....	98
5.7.2	Spezielle SE-Legierungen für Hartmagnete.....	98
5.7.3	Spezielle SE-Legierungen für weiche Magnete .....	101
5.7.4	Silber-und Silberlegierungen.....	103
5.7.5	Gold-Legierungen .....	105
5.8	Katalysatormetalle.....	106
5.9	Leiterkarten .....	107
5.10	Kontrastmittel in der Medizin .....	108
5.11	Spezielle Metallapplikationen .....	110
5.11.1	Applikationen der Edelmetalle Platin und Palladium .....	110
5.11.2	Applikationen des Halbmetalles Selen.....	110
5.11.3	Applikationen der Refraktären Metalle Niob, Tantal und Wolfram .....	111
5.11.4	Applikationen vom Antimon.....	113
5.11.5	Applikationen vom Germanium.....	114
5.11.6	Applikationen vom Indium .....	115
<b>6</b>	<b>Recycling als Rohstoffquelle.....</b>	<b>117</b>
6.1	Metallische Rohstoffreserven.....	117
6.2	Gesetzliche Grundlagen .....	119
6.3	Aufkommen an WEEE.....	120
6.4	Materialverluste und Recyclingquoten.....	121
6.5	Rücknahme, Pfandsysteme und Upcycling .....	123
6.6	Aufarbeitung von ehemaligen Bergbau- und Hüttenhalden .....	124
<b>7</b>	<b>Recycling Logistik.....</b>	<b>125</b>
7.1	Sammeln von Elektroaltgeräten .....	126
7.2	Demontage von EOL-Produkten .....	128
7.2.1	Demontage von Laptop-Geräten .....	129
7.2.2	Demontage von Bildschirm- und TV-Geräten .....	130
7.2.3	Demontage von Solarmodulen .....	131
7.2.4	Demontage von Abgaskatalysatoren.....	132
7.2.5	Demontage von medizintechnischen Geräten .....	132
7.2.6	Entnahme von Ta-Kondensatoren .....	133
7.2.7	Recycling von Akkus .....	134
7.2.8	Zukünftiges Recycling von E-Motoren.....	135
7.2.9	Demontage von Handys .....	135
7.2.10	Sammlung von Festplatten.....	136
7.2.11	Zerlegen von Glasfaserkabeln.....	136
<b>8</b>	<b>Primäre und sekundäre Metallverhüttung.....</b>	<b>139</b>
8.1	Pyrometallurgie .....	139
8.1.1	Metalle aus Metallschmelzen .....	139

8.1.2	Metallextraktionen durch Seigern.....	141
8.1.3	Extraktionen von Nd-Abfällen mit Mg oder Ag.....	142
8.1.4	Pyrolyse mittels Vergasungstechnik.....	144
8.1.5	Aufarbeitung von Armerzen und hochverdünntem Recyclinggut.....	145
8.2	Hydrometallurgie.....	148
8.2.1	Metalle aus Elektrolysen.....	148
8.2.2	Aufschlüsse mit Säuren.....	149
8.2.3	Basische Aufschlüsse zur Metallgewinnung.....	159
8.2.4	Verluste bei hydrometallurgischer Gewinnung.....	161
8.3	Extraktion mit Reaktantgasen.....	163
8.3.1	Extraktion mit Cl <sub>2</sub> oder HCl.....	163
8.3.2	Extraktion mit Wasserstoff.....	167
8.3.3	Umsetzung durch Verbrennung von Recyclingmaterialien.....	168
8.4	Herstellung von Lithium.....	168
8.5	Hochreine Metalle.....	169
8.6	Recycling von Polystyrenabfällen.....	170
<b>9</b>	<b>Recycling und Umwelt.....</b>	<b>173</b>
9.1	Recycling als Klimaschutz.....	173
9.2	Ökotoxikologische Probleme bei der Abwasseraufarbeitung.....	174
9.2.1	Nanosilber im Abwasser.....	174
9.2.2	Gd-Ionen im Abwasser.....	174
9.2.3	Schwermetallionen aus Elektrolysebädern.....	176
9.3	Hg-Schadstoffentfrachtung beim Recycling von Leuchtstoffröhren.....	176
9.4	Schadstoffe bei Pyrolyseverfahren.....	177
<b>10</b>	<b>Substitutionen Kritischer Elemente.....</b>	<b>179</b>
10.1	Substitutionsmodelle.....	179
10.2	Substitutionsbeispiele für SE-Metalle.....	181
10.2.1	Statikspeicher für Kleinrechner.....	181
10.2.2	Reluktanzmotor.....	181
10.2.3	Substitution der Gd-Kontrastmittel.....	182
<b>11</b>	<b>Elementanalytik.....</b>	<b>185</b>
11.1	Probenahme und Probenvorbereitung.....	185
11.2	Spektroskopische Bestimmungsverfahren.....	185
11.2.1	Atomemissionsanalyse (AES).....	187
11.2.2	ICP-Massenspektroskopie (ICP-MS).....	188
11.2.3	Röntgenfluoreszenzanalyse RFA.....	189
11.2.4	Qualitative UV/VIS-Spektroskopie.....	190
11.2.5	IR-Spektroskopie.....	191
11.3	Quantitative Analytik, Reinheit und Konzentrationsmaße.....	193
11.3.1	Quantitative UV/VIS-Spektroskopie.....	193
11.3.2	Atomabsorptionsspektroskopie (AAS).....	194
11.3.3	Dotierung und Reinheit.....	195

11.4	Sensorik und analytische Schnellbestimmungen.....	196
<b>12</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>199</b>
	Tabellen.....	199
	Wissenschaftlervverzeichnis.....	205
	Glossar.....	209
	<b>Literatur.....</b>	<b>239</b>
	<b>Index .....</b>	<b>249</b>