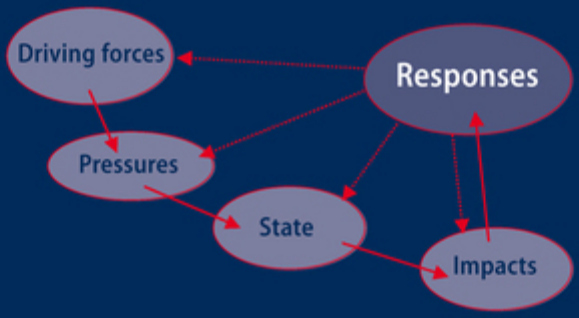
Ulrich Förstner

# Umweltschutz-technik

8., neu bearbeitete Auflage




Springer

Umweltschutztechnik

Ulrich Förstner

# Umweltschutztechnik

8., neu bearbeitete Auflage

Springer

Prof. Dr. Ulrich Förstner
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft
Eißendorfer Straße 40
21071 Hamburg
Deutschland
u.foerstner@tu-harburg.de

ISBN 978-3-642-22972-5 e-ISBN 978-3-642-22973-2
DOI 10.1007/978-3-642-22973-2
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990, 1991, 1992, 1993, 1995, 2004, 2008, 2012
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.
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.

*Einbandentwurf:* WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

*Für*

*Dirk, Barbara, Jens, Konrad und Friedrich*

# Vorwort zur 8. Auflage

Joachim Radkaus „Die Ära der Ökologie – eine Weltgeschichte“, erschienen im Februar 2011, endet mit dem Satz: „aus der Geschichte erkennt man, dass es den historischen Augenblick gibt, wo das Trägheitsmoment bestehender Strukturen durchbrochen wird und manches möglich wird, was bis dahin als unmöglich galt“.

Es wäre zu kurz gegriffen, würde man hier eine Vorahnung auf die Katastrophe im japanischen Fukushima sehen. Tatsächlich hatte die „Große Transformation“ (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) längst begonnen und auch die „Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung“ (Sachverständigenrat für Umweltfragen) waren bereits vorgezeichnet. Inzwischen hatte die „Energiewende“ schon die traditionellen Praxisgebiete der Wasser- und Abfallwirtschaft erreicht. Die vorliegende 8. Auflage der „Umweltschutztechnik“ beschreibt diese neueren Entwicklungen in den einzelnen Umweltmedien.

„Innovationsorientierte Industriepolitik – ein Megatrend?“ war eine zentrale Frage im Jahresgutachten 2008 des Sachverständigenrats. Die Prognosen u.a. von Roland Berger Strategy Consultants („GreenTech made in Germany“) und die Studie „Roadmap Umwelttechnologien 2020“ des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (KIT Karlsruhe) haben die Marktchancen und die Prioritätsfelder im Wirtschaftssektor Umwelttechnik aufgezeigt. Das Kapitel 2 des vorliegenden Buchs befasst sich mit den Aufgaben der technischen Disziplinen im betrieblichen Umweltschutz. Der Gastbeitrag von Alexander Holst (Accenture) führt die verschiedenen Aspekte zusammen: „Wie Nachhaltigkeit zum Unternehmenserfolg beiträgt: branchenspezifisch, heute und in der Zukunft“.

Umweltschutztechnik ist in gesetzliche Regelungen eingebettet. In dieser Phase wird die Umsetzung der EU-Richtlinien in nationales Umweltrecht abgeschlossen. Fast alle Umweltbereiche sind betroffen: Abfallwirtschafts- und Kreislaufgesetz, Deponieverordnung; Wasserhaushaltsgesetz, Abwasserverordnung und Abwasserabgabengesetz; Klärschlammverordnung; Trinkwasserverordnung; Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV). Immer wichtiger werden die EU-weiten BVT(Beste verfügbare Techniken)-Standards nach der Richtlinie „Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ (IVU). Die praktische Vorgehensweise wird hier an Beispielen aus den Branchen „Müllverbrennung“ und „Abfallbehandlung“ beschrieben.

Das vorliegende Buch will auf der einen Seite ein breites technikorientiertes Umweltwissen vermitteln, andererseits aber auch den Spezialisten die Querverbindungen zu benachbarten Bereichen erleichtern. Dies gilt u.a. für die Mitwirkung an interdisziplinären Forschungsprojekten zu Fragen der Energie- und Rohstoffeffizienz. So soll sich das kommende EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation – nach dem Eckpunktepapier des BMBF – ab dem Jahr 2014 noch stärker als bisher der Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung und ihrer Anwendung in der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Praxis verschreiben.

Hamburg, im August 2011 Ulrich Förstner

# Vorwort zur 7. Auflage

Das Projekt „Umweltschutztechnik“ wurde gemeinsam mit dem Springer-Verlag vor 20 Jahren gestartet und die ersten fünf Auflagen dieses Buchs erschienen in rascher Folge zwischen 1990 und 1995. Die 6. Auflage von 2003 stand am Beginn eines neuen Aufschwungs des ökologisch-technischen Umweltschutzes, begleitet von der erstaunlichen Entwicklung des Umweltinteresses in Europa, das bis heute unvermindert anhält. Gleichzeitig verstärkte sich die globale Debatte über Klima und Energie – das Leitthema der vorliegenden 7. Auflage.

Durch die enge Verknüpfung der übrigen Umweltaspekte mit der Energiefrage haben auch bei den traditionellen Schwerpunktthemen Luftreinhaltung, Wasser/-Abwasser und Boden/Abfall/Recycling größere Veränderungen stattgefunden, die hier beschrieben werden. Die Serie von Gastbeiträgen (in der 6. Auflage „Biotestsysteme“; „Biofilme“, „Recycling im Automobilbau“ und „Nachhaltige Wasserversorgung“) wird in der 7. Auflage mit den Beiträgen von Prof. Joachim Werther und Dr. Henning Friege zum Thema „Stoff- und Energiewirtschaft“ fortgeführt.

Dieses Buch schlägt Brücken zwischen der Grundlagenforschung und der Praxis, aber auch zwischen unterschiedlichen Weltbildern. Beispielhaft zeigen das die beiden Originalbeiträge, die mit zwei Veranstaltungen (beide am selben Tag in Berlin) zu den Themen „Klimawandel“ und „Nachhaltigkeit“ verbunden sind:

- Beim ”European Sustainability Summit“ der Zeitschrift *The Economist* befasste sich der Themenschwerpunkt ”Consumers and Businesses: Moving to a New Mindset – Seizing the Opportunities?” mit den wichtigsten Treibern für erfolgreiche Geschäfte in Zeiten des Klimawandels: Der Einstellung der Verbraucher, dem technologischen Fortschritt und der Entwicklung neuer Vermarktungsmodelle. Alexander Holst von Accenture hat internationale Umfragen zu diesen Themen bei Managern und Verbrauchern im Abschn. 2.4.3 „Marktperspektiven für Umweltschutztechnologien“ ausgewertet.
- Bei der Vorstellung der Neuauflage des Buchs „Ökologische Ökonomie – eine Einführung” (VS Verlag 2008) des Berliner Umweltökonomen und Vorsitzenden der Gesellschaft für Nachhaltigkeit, Prof. Holger Rogall, dominierte in den Diskussionen der kritische Blick auf die „Leitplanken“ für ein sozio-kulturell, ökonomisch und ökologisch ausgewogenes Wirtschaften. Die 10 Kernaussagen Rogalls zur Neuen Ökonomie in den Grenzen der natürlichen Tragfähigkeit stehen im Abschn. 1.1.2 „Umsetzung des Leitbildes Nachhaltigkeit“.

Mein herzlicher Dank geht an die Autoren dieser Beiträge und an alle, die mich mit Detailinformationen unterstützt haben. Für die Anfertigung der Abbildungen bedanke ich mich bei Eveline Hassenklöver und meinem Sohn Friedrich Förstner, für die Zusammenstellung über Literaturdatenbanken bei Herrn Thomas Hapke. Dem Springer-Verlag, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lehnert und Frau Sigrid Cuneus, danke ich für das anhaltende Interesse an diesem Projekt und für die aufwändige redaktionelle Bearbeitung der vorliegenden Auflage.

Hamburg, im Mai 2008 Ulrich Förstner

# Inhaltsverzeichnis


**1 Grundlagen der Umweltschutztechnik** . . . . . 1
1.1 Entwicklung der Leitbilder und Strategien . . . . . 1
1.1.1 Umweltprobleme und Umwelthandeln . . . . . 4
1.1.2 Leitbild „Nachhaltigkeit" von Holger Rogall . . . . . 7
1.1.3 Umsetzung des Leitbildes „Nachhaltigkeit" . . . . . 14
1.1.4 Strategische Handlungsfelder – Perspektiven 2020 . . . . . 18
1.1.5 Nachhaltigkeitsmodelle für Klimawandel und Energiewende . . . . . 21
1.2 Ökologische Grundlagen . . . . . 30
1.2.1 Struktur von Ökosystemen . . . . . 30
1.2.2 Stabilität von Ökosystemen und technischen Systemen . . . . . 31
1.3 Technologische Grundlagen . . . . . 34
1.3.1 Risikoforschung . . . . . 36
1.3.2 Umweltinformatik . . . . . 40
1.3.3 Prozessleittechnik . . . . . 42
1.3.4 Verfahrenstechnik . . . . . 44
1.3.5 Biotechnologie . . . . . 47
1.3.6 Nanotechnologie . . . . . 51
1.3.7 Technische Geochemie . . . . . 52
1.3.8 Ingenieurgeologie und Geotechnik . . . . . 53
1.3.9 Schutzmaßnahmen im Wasserbau . . . . . 54
1.3.10 Energiesparende Bautechnik . . . . . 55
1.3.11 Umweltschutztechnik als Querschnittsdisziplin . . . . . 56
1.4 Literatur . . . . . 57

**2 Umwelttechnik im Unternehmen** . . . . . 65
2.1 Umweltrecht und Umweltpolitik als Rahmen . . . . . 65
2.1.1 Entwicklung des Umweltrechts in Deutschland (nach [2.7]) . . . . . 66
2.1.2 Maßnahmen zur Umsetzung von umweltpolitischen Zielen . . . . . 67
2.2 Ökologische Ausrichtung der Betriebswirtschaft . . . . . 71
2.2.1 Einflüsse des Umweltschutzes auf die Unternehmen . . . . . 72
2.2.2 Einsatz ökologieorientierter Managementsysteme . . . . . 76
2.2.3 Integrierter betrieblicher Umweltschutz . . . . . 78
2.2.4 Instrumente ökologischer Industriepolitik . . . . . 80
2.3 Technik im betrieblichen Umweltschutz . . . . . 81
2.3.1 Materialwirtschaft und Logistik . . . . . 81
2.3.2 Produktion- und Fertigungstechnik . . . . . 83
2.3.3 Verfahrensinterner Umweltschutz . . . . . 84
2.3.4 Green Chemistry – Katalyseforschung . . . . . 87
2.3.5 Industrielle Symbiose – Ökopark . . . . . 88

2.4 Umweltschutzwirtschaft . . . . . 90
2.4.1 Marktperspektiven für Umweltschutztechnologien . . . . . 91
2.4.2 Ressourceneffizienz und zukunftsfähige Rohstoffpolitik . . . . . 93
2.4.3 Wie Nachhaltigkeit zum Unternehmenserfolg beiträgt: branchenspezifisch, heute und in der Zukunft von Alexander Holst [2.127] . . . . 101
2.5 Literatur . . . . . 111

**3 Schadstoffe** . . . . . 119
3.1 Gefahrstoffrecht, Schadwirkungen . . . . . 119
3.1.1 Gefahrstoffrecht . . . . . 122
3.1.2 Schadwirkungen . . . . . 124
3.1.3 Umweltgefährliche Stoffeigenschaften . . . . . 127
3.1.4 Umweltstandards . . . . . 128
3.1.5 Zeitskalen der Schadstoffausbreitung . . . . . 130
3.1.6 Parameter der Stoffdynamik in der Umwelt . . . . . 131
3.2 Schwermetalle . . . . . 133
3.2.1 Umwelttechnische Relevanz . . . . . 133
3.2.2 Herkunft und Wirkung . . . . . 134
3.3 Organische Schadstoffe . . . . . 136
3.3.1 Umwelttechnische Relevanz . . . . . 136
3.3.2 Herkunft und Wirkung . . . . . 139
3.4 Strahlung . . . . . 143
3.4.1 Natürliche Strahlenbelastung [3.46] . . . . . 144
3.4.2 Künstliche Strahlenbelastung . . . . . 145
3.4.3 Elektrosmog . . . . . 146
3.5 Literatur . . . . . 147

**4 Klima und Energie** . . . . . 151
4.1 Grundlagen des Klimaschutzes . . . . . 151
4.1.1 Wirkung und Herkunft der Treibhausgase . . . . . 153
4.1.2 Übergang zu einem nachhaltigeren Energiesystem . . . . . 154
4.2 Rationelle Energieerzeugung . . . . . 158
4.2.1 Umwandlung von Energieformen . . . . . 158
4.2.2 Entkarbonisierung . . . . . 159
4.2.3 Kraft-Wärme-Kopplung . . . . . 160
4.2.4 Einsatz von Brennstoffzellen . . . . . 164
4.2.5 Erhöhung der Wirkungsgrade von Kraftwerken . . . . . 166
4.2.6 $CO_2$-Sequestrierung – Carbon Capture Storage Technologien . . . . . 170
4.3 Einsparpotenziale . . . . . 172
4.3.1 Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen . . . . . 172
4.3.2 Fahrzeugtechnik . . . . . 174
4.3.3 Haushalte . . . . . 175
4.4 Erneuerbare Energien . . . . . 180
4.4.1 Nutzungsformen, Potenziale und Limitierungen . . . . . 182

4.4.2 Geothermie . . . . . 186
4.4.3 Solarthermische Wärmebereitstellung . . . . . 187
4.4.4 Photovoltaik . . . . . 188
4.4.5 Windenergie . . . . . 190
4.4.6 Biomasse . . . . . 192
4.5 Instrumente der Energiewende . . . . . 198
4.5.1 Wasserstoff und Methan aus Erneuerbaren Energien . . . . . 198
4.5.2 Stromspeicher [4.130] . . . . . 200
4.5.3 Lastmanagement [4.130] . . . . . 201
4.5.4 IKT-betriebene Energiesysteme . . . . . 202
4.6 Literatur . . . . . 204

**5 Immissionsschutz** . . . . . 213
5.1 Ursachen und Wirkungen von Luftbelastungen . . . . . 213
5.1.1 Luftschadstoffe in der Troposphäre [5.7] . . . . . 215
5.1.2 Entstehung von Stickoxiden [5.9, 5.10] . . . . . 215
5.1.3 Entstehung von Schwefeldioxid [5.9] . . . . . 216
5.1.4 Ausbreitung von Luftschadstoffen . . . . . 217
5.1.5 Wirkungen von Luftschadstoffen . . . . . 219
5.2 Rechtsnormen und Ausbreitungsmodelle . . . . . 222
5.2.1 Rechtsnormen . . . . . 223
5.2.2 Feinstaub/Schwebstaub (PM) . . . . . 226
5.2.3 Ausbreitungmodelle . . . . . 228
5.3 Luftreinhaltungstechniken . . . . . 229
5.3.1 Staubemissionen . . . . . 229
5.3.2 Verminderung gasförmiger Emissionen [5.29] . . . . . 233
5.3.3 Entschwefelung in Kraftwerken . . . . . 236
5.3.4 Minderung von Stickoxiden . . . . . 237
5.3.5 Kosten der Stromerzeugung . . . . . 241
5.3.6 Abgasreinigung bei Kraftfahrzeugen . . . . . 242
5.4 Verkehrslärm . . . . . 246
5.5 Literatur . . . . . 249

**6 Abwasser** . . . . . 255
6.1 Gewässergüte und Wasserbeschaffenheit . . . . . 255
6.1.1 EG-Wasserrahmenrichtlinie und Wasser-Agenda 21 . . . . . 258
6.1.2 Klassifizierung der Gewässergüte und Wasserbeschaffenheit . . . . . 259
6.2 Abwässer und ihre Bestandteile . . . . . 260
6.2.1 Sammlung und Ableitung des Abwassers . . . . . 260
6.2.2 Die kommunale Kläranlage . . . . . 261
6.2.3 Schadstoffe im Abwasser . . . . . 262
6.2.4 Gesetzliche Regelungen . . . . . 264
6.3 Biologische Abwasserreinigung . . . . . 266
6.3.1 Biologische Prinzipien und ihre technischen Anwendungen . . . . . 266

6.3.2 Tropfkörperverfahren [6.36] . . . . . 269
6.3.3 Belebungsverfahren . . . . . 270
6.3.4 Biologische Phosphor- und Stickstoff-Eliminierung . . . . . 272
6.4 Chemisch-Physikalische Abwasserreinigung . . . . . 274
6.4.1 Fällung von Schwermetallen . . . . . 275
6.4.2 Flockung und fest-/flüssig-Trennung [6.43] . . . . . 278
6.4.3 Behandlung von Abwässern mit organischen Schadstoffen . . . . . 281
6.5 Schlammbehandlung . . . . . 283
6.5.1 Verfahrensstufen der Schlammbehandlung . . . . . 284
6.5.2 Aerobe Schlammbehandlung – Hygienisierung . . . . . 284
6.5.3 Anaerobe Abwasser- und Schlammbehandlung . . . . . 285
6.5.4 Abtrennung des Schlammwassers . . . . . 286
6.5.5 Schlammtrocknung und Schlammverbrennung . . . . . 287
6.5.6 Klärschlamm: Ressoucenschonung vs. Bodenschutz . . . . . 290
6.6 Integrierte Wasserwirtschaft . . . . . 291
6.6.1 Integration des Gesamtsystems Siedlungswasserwirtschaft . . . . . 292
6.6.2 Integrierte dezentrale Abwasserentsorgungskonzepte . . . . . 294
6.6.3 Flussgebietsmanagement mit kontaminierten Sedimenten . . . . . 297
6.6.4 Ausblick: Energieeffizienz und demographischer Wandel . . . . . 300
6.7 Literatur . . . . . 303

**7 Trinkwasser** . . . . . 311
7.1 Trinkwasserversorgung . . . . . 311
7.1.1 Trinkwassernutzung und Einsparmöglichkeiten . . . . . 317
7.1.2 Wasserbeschaffung . . . . . 318
7.1.3 Werkstoffe in Leitungsnetzen [7.21] . . . . . 320
7.1.4 Trinkwasserverordnung . . . . . 322
7.2 Einflüsse auf die Wasserqualität . . . . . 325
7.2.1 Chemische Reaktionen im Untergrund . . . . . 326
7.2.2 Biologische Vorgänge im Untergrund . . . . . 328
7.3 Methoden der Trinkwasseraufbereitung . . . . . 330
7.3.1 Künstliche Grundwasseranreicherung und Uferfiltration . . . . . 332
7.3.2 Physikalisch-Chemische Behandlungsverfahren . . . . . 334
7.3.3 Biologische Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung [7.56] . . . . . 339
7.3.4 Verfahrenskombinationen bei der Trinkwasseraufbereitung . . . . . 339
7.3.5 Technisches Sicherheitsmanagement für Trinkwasser . . . . . 341
7.4 Literatur . . . . . 343

**8 Boden und Altlasten** . . . . . 347
8.1 Grundlagen und Stand des Bodenschutzes . . . . . 347
8.2 Art und Ausmaß von Stoffeinträgen in Böden . . . . . 350
8.2.1 Anreicherung von Schadstoffen in Böden . . . . . 350
8.2.2 Prozesse der Schadstofffreisetzung und -bindung . . . . . 351
8.2.3 Perspektiven für landwirtschaftlich genutzte Böden [8.10] . . . . . 354

8.3 Altlastenprobleme . . . . . 354
8.3.1 Sanierungsziele . . . . . 356
8.3.2 Erkundung von Altablagerungen und Altstandorten . . . . . 357
8.4 Sicherungsmaßnahmen . . . . . 360
8.4.1 Ausgraben und Umlagern . . . . . 360
8.4.2 Barrierensysteme . . . . . 361
8.4.3 Verfestigung, Stabilisierung und Einbindung . . . . . 363
8.5 Sanierung von Altlasten . . . . . 365
8.5.1 Bodenluftabsaugung . . . . . 365
8.5.2 Waschverfahren . . . . . 366
8.5.3 Biologische Behandlung von Altlasten . . . . . 368
8.5.4 Thermische Behandlung kontaminierter Böden . . . . . 370
8.6 In-situ Methoden . . . . . 372
8.6.1 Sickerwasserprognose [8.54] . . . . . 373
8.6.2 Natürlicher Abbau und Rückhalt . . . . . 376
8.6.3 Reinigungswände [8.75] . . . . . 380
8.6.4 Flächenrecycling – nachhaltiges Flächenmanagement . . . . . 381
8.7 Literatur . . . . . 382

**9 Abfall** . . . . . 389
9.1 Abfallwirtschaftliche Grundlagen . . . . . 389
9.1.1 Abfallwirtschaftliche Leitperspektiven . . . . . 389
9.1.2 Grundsätze der Kreislaufwirtschaft [9.16] . . . . . 394
9.1.3 Abfallaufkommen in Deutschland . . . . . 396
9.2 Abfälle – vom Abraum bis zum Hausmüll . . . . . 398
9.2.1 Abfälle aus der Bergbautätigkeit . . . . . 398
9.2.2 Behandlung von Massenabfällen . . . . . 402
9.2.3 Chemisch-physikalische Behandlung von Industrieabfällen . . . . . 404
9.2.4 Hausmüll . . . . . 406
9.3 Müllverbrennung . . . . . 412
9.3.1 Müllverbrennungsanlagen . . . . . 414
9.3.2 Rauchgasreinigung . . . . . 416
9.3.3 Rückstandsbehandlung . . . . . 417
9.3.4 Verwertung von Müllverbrennungsschlacken [9.62] . . . . . 420
9.3.5 Thermische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland [9.94] . . . . . 422
9.4 Deponierung . . . . . 423
9.4.1 Deponiegas und Sickerwasser . . . . . 424
9.4.2 Langzeitprognose für Deponien . . . . . 428
9.5 Literatur . . . . . 431

**10 Recycling** . . . . . 439
10.1 Theorie und Praxis des Recycling . . . . . 439
10.1.1 Formen des Recycling . . . . . 441
10.1.2 Bilanzierung von Stoff- und Energiekreisläufen . . . . . 442

10.2 Recycling in verschiedenen Wirtschaftssektoren . . . . . 444
10.2.1 Verwertung im Bergbau und in der Grundstoffindustrie . . . . . 444
10.2.2 Urban Mining, Recycling von Baumaterialien . . . . . 446
10.2.3 Recycling von Kunststoffen . . . . . 450
10.2.4 Aufbereitung von Elektronikschrott . . . . . 454
10.2.5 Altfahrzeug-Recycling . . . . . 456
10.3 Integrierte Stoffwirtschaft . . . . . 458
10.3.1 Entwicklung einer integrierten Abfallwirtschaft in Europa . . . . . 458
10.3.2 Material- und Energie-Intensität über einen Gebrauchszyklus . . . . . 460
10.3.3 Vermeidung von Abfällen und Schadstoffen . . . . . 461
10.3.4 Alternativen für eine nachhaltige Reststoffverwertung . . . . . 462
10.3.5 Abfallwirtschaft und Klimaschutz . . . . . 463
10.4 Literatur . . . . . 466

**Anhang**

**Anhang zu Kapitel 1** . . . . . 471
A 1.1 Das Vorsorgeprinzip im Umweltschutz (aus: 2.–4. Auflage) . . . . . 471
A 1.2 Definitionen zur Umwelttechnik (Coenen et al. 1995, S. 21–25) . . . . . 472
A 1.3 Frühe Denkansätze zu Umwelt und Technik (aus 1. Auflage) . . . . . 474
A 1.4 Technik – angepasst oder superindustrialisiert? (aus 1. Auflage) . . . . . 476
A 1.5 Zum Begriff „Transition“ – Neue Wege in die Nachhaltigkeit . . . . . 478

**Anhang zu Kapitel 2** . . . . . 479
A 2 Entwicklung „Umwelttechnik im Unternehmen“ (4. Auflage) . . . . . 479

**Anhang zu Kapitel 3** . . . . . 481
A 3 Entwicklung und Leitbilder der Chemiepolitik (5. Auflage) . . . . . 481

**Anhang zu Kapitel 4** . . . . . 483
A 4.1 Energetische Umrechnungsfaktoren . . . . . 483
A 4.2 Aufteilung des Energieverbrauchs in Deutschland 2004 . . . . . 483
A 4.3 IEKP-Gesetze, KWK-Markt, GuD-Anlagen, Bioenergie (7. Aufl.) . . . . 484
A 4.3.1 Integriertes Energie-/Klimaprogramm der Bundesregierung . . . . . 484
A 4.3.2 Marktperspektiven der Kraft-Wärme-Kopplung . . . . . 486
A 4.3.3 Einsatzstoffe, Emissionen, Nebenprodukte in GuD-Anlagen . . . . . 488
A 4.3.4 Humid Air Turbine (HAT) als Alternative zum GuD-Prozess . . . . . 489
A 4.3.5 Fortschreibung der Bioenergietechnologien bis 2020/2030 . . . . . 490
A 4.4 Energiewende 2011: EE-Bericht, Regelungen, Vergütungen . . . . . 492
A 4.4.1 Erfahrungsbericht 2011 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz . . . . . 492
A 4.4.2 Beschlüsse des Bundeskabinetts zur Energiewende 2011 . . . . . 494
A 4.4.3 Vergütungen und Kosten nach dem EE-Gesetz 2011 . . . . . 495
A 4.5 E-Energy – Smart Grids in Germany . . . . . 496

**Literatur Anhang**

**Literatur Anhang Kapitel 1** . . . . . 498
A 1.1 Das Vorsorgeprinzip im Umweltschutz . . . . . 498
A 1.3 Frühe Denkansätze zu Umwelt und Technik . . . . . 498
A 1.4 Technik – angepasst oder superindustrialisiert? . . . . . 499

**Literatur Anhang Kapitel 2** . . . . . 500
A 2 Entwicklung „Umwelttechnik im Unternehmen“ . . . . . 500

**Literatur Anhang Kapitel 3** . . . . . 502
A 3 Entwicklung und Leitbilder der Chemiepolitik . . . . . 502

**Literatur Anhang Kapitel 4** . . . . . 503
A 4.3 IEKP-Gesetze, KWK-Markt, GuD-Anlagen, Biomasse . . . . . 503
A 4.3.1 Integriertes Energie-/Klimaprogramm der Bundesregierung . . . . . 503
A 4.3.2 Marktperspektiven der Kraft-Wärme-Kopplung . . . . . 504
A 4.3.3 Einsatzstoffe, Emissionen, Nebenprodukte in GuD-Anlagen . . . . . 505
A 4.3.4 Humid Air Turbine (HAT) als Alternative zum GuD-Prozess . . . . . 505
A 4.3.5 Fortschreibung der Bioenergietechnologien bis 2020/2030 . . . . . 505

**Literaturdatenbanken „Umweltschutztechnik“** . . . . . 506

# Verzeichnis der Kasten-Themen

**Verzeichnis der Kasten-Themen aus Kapitel 1 – 4**


| Kap. | Thema | Seite |
|---|---|---|
| 1.1.1 | „Die Technologiepolitik muss sich auf die Technologien des 'Jahrhunderts der Umwelt' konzentrieren“ (E.U. v. Weizsäcker) | 5 |
| 1.1.2 | Nachhaltigkeit in Politik, Recht und Verwaltung – Beispiele aus der Schweiz (Knoepfel) | 13 |
| 1.1.5 | Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation (WBGU, Wiss. Beirat Globale Umweltveränderungen) | 23 |
| 1.1.5 | Weltklimarat zur Zukunft der Regenerativen Energien (IPCC) | 25 |
| 1.1.5 | Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung – Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU) | 27 |
| 1.2.2 | Gekoppelte Kreislaufprozesse: Die Erde als Wärmemaschine | 33 |
| 1.3.1 | Acht Grundregeln für überlebensfähige Systeme (Vester) | 35 |
| 2.1.2 | Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik (BImSchG), Produktverantwortung (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) | 69 |
| 2.2.1 | Studien und Broschüren zum Thema „Nachhaltiges Wirtschaften“ | 73 |
| 2.2.1 | Beispiel: Unternehmensbericht „Zukunft gestalten“ (BASF) | 75 |
| 2.3.3 | Umweltgerechte Produktgestaltung – Integrierte Produktpolitik | 85 |
| 2.4.2 | Alternativen bei der Verwendung seltener Rohstoffe (CS3) | 97 |
| 2.4.2 | Sachverständigenrat für Umweltfragen: „Umweltinnovationen“ | 100 |
| 3.1.4 | Grenzwerte im Spannungsfeld von Politik, Ökonomie und Wissenschaft (Dieter & Grohmann) | 129 |
| 3.3.1 | Chlorkohlenwasserstoffverbindungen – Struktur und Benennung | 137 |
| 3.3.2 | Abbaubarkeit von organischen Schadstoffen (Track & Michels) | 141 |
| 4.1.1 | Geschichte einer wissenschaftlichen Konsensbildung | 152 |
| 4.1.2 | Strategiepfade einer nachhaltigen Entwicklung im Energiebereich | 155 |
| 4.2.3 | „Bullensee-These“ Nr. 8 zur Dezentralen Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung (Luther et al.) | 161 |
| 4.2.4 | Elektromobilität – Potenziale und Herausforderungen (acatech) | 165 |
| 4.2.5 | Neue Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke | 167 |
| 4.2.6 | Initiative COORETEC (*$CO_2$-Re*duktions-*Tec*hnologien) für Kohlekraftwerke (BMWi) | 171 |
| 4.3.1 | „Vermeidungshebel“ für $CO_2$-Emissionen in der Industrie (BDI) | 173 |
| 4.3.3 | Vermeidungskostenkurve im Gebäudesektor – Deutschland 2020 | 177 |
| 4.4.5 | Genehmigungsverfahren für deutsche Offshore-Windparks (BSH) | 191 |
| 4.4.6 | VDI Statusreport „Regenerative Energien in Deutschland“ | 197 |
| 4.5.1 | Wasserstoff und synthetisches Erdgas nehmen Fahrt auf | 199 |