
Umweltschutztechnik

Ulrich Förstner · Stephan Köster

Umweltschutztechnik

9. Auflage

 Springer Vieweg

Ulrich Förstner
Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

Stephan Köster
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Universität Hannover
Hannover, Deutschland

ISBN 978-3-662-55162-2

ISBN 978-3-662-55163-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55163-9>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990, 1991, 1992, 1993, 1995, 2004, 2008, 2012, 2018

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 9. Auflage

Die Umweltkompartimente Wasser, Luft und Boden stehen weltweit nach wie vor unter erheblichem Druck. Trotz vielerorts unbestreitbarer Errungenschaften im Bereich des Umweltschutzes führen gleich mehrere globale Entwicklungen dazu, dass der Schutz unserer Umwelt noch nicht die Erfolge zeitigt, die eigentlich notwendig wären. Die Weltbevölkerung steigt weiter stark an, was sehr konkrete Versorgungsfragen nach sich zieht. Zeitgleich gelingt es immer mehr Schwellenländern, die Wohlstandsversprechen an ihre Bevölkerung einzulösen. Dies verstärkt die weltweite Ressourceninanspruchnahme, die bisher nicht vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden konnte. Zusätzlich wachsen viele Städte und dies zum Teil rasant. Doch besonders Städte gelten als sehr vulnerabel gegenüber dem Klimawandel.

Die langjährige Auseinandersetzung mit dem Klimawandel demonstriert eindrucksvoll, dass eine völkerübergreifende Festlegung und Umsetzung von Umweltschutzziele sehr schwierige und langwierige Prozesse sind. Vielmehr erkennen wir immer deutlicher, wie schwierig es ist, tatsächlich nachhaltig zu leben und zu wirtschaften. So werden die Grundsätze des nachhaltigen Wirtschaftens „in den Grenzen der natürlichen Tragfähigkeit“ in diesem Buch besonders gewürdigt (Gastbeitrag von dem Berliner Umweltökonom und Vorsitzenden der Gesellschaft für Nachhaltigkeit, Prof. Holger Rogall im Teilkapitel 2.2).

In diesem Zusammenhang ist von neuem die Bedeutung des Umweltschutzes hervorzuheben. Er dient dem Erhalt unserer Lebengrundlagen und zielt eben nicht einseitig auf eine Belastung der Wirtschaft ab, wie es oftmals fälschlich wahrgenommen wird. Die Umweltschutztechnik leistet einen wichtigen Beitrag zum Umweltschutz. Sie versucht, die Inanspruchnahme der Umwelt und ihre anthropogen bedingte Verunreinigung so gut wie möglich auszugleichen. Hierzu sind teilweise hochentwickelte Prozesse und Technologien im Einsatz. In diesem Kontext sind die „Besten Verfügbaren Techniken“ hervorzuheben, die auf europäischer Ebene im Rahmen des Sevilla-Prozesses stetig weiterentwickelt werden (u.a. in den Kapiteln 5 Immissionsschutz und 9 Abfall).

Aber gelingt die Ausrichtung auf die Zukunft? Nach der Energiewende haben die Themen „Ressourcenschutz“ (neues Teilkapitel 2.3) und „Kreislaufwirtschaft“ (überarbeitetes Kapitel 10) nochmals an Bedeutung gewonnen. Allerdings entstehen auch neue Konfliktebenen. Im Kontext der „Erneuerbaren Energien“ (Kapitel 4 Klima und Energie) hat sich die Energiegewinnung aus landwirtschaftlich gewonnener Biomasse etabliert. Aber steht die hierfür erforderliche Landnutzung auch im Einklang mit regionalen und globalen Ernährungsfragen (Kapitel 8 Bodenschutz)? Die intensive Landwirtschaft tangiert ganz erheblich die (urbane) Wasserwirtschaft. Es ist besorgniserregend, dass die derzeitige Qualität der für die Trinkwasserversorgung genutzter Rohwässer vielfach durch ansteigende bzw.

nicht fallende Nitratkonzentrationen in den für uns so wichtigen Grundwasserleitern in Frage gestellt wird. Dieses und weitere aktuelle Themen wie Plastikeinträge in die aquatischen Umwelt und Möglichkeiten der Reduktion anthropogener Mikroschadstoffe werden in den vollständig überarbeiteten Kapiteln 6 Abwasser und 7 Trinkwasser diskutiert.

Ein erfolgreicher Umweltschutz ist ohne Umweltschutztechnik nicht möglich. Das vorliegende Handbuch soll einen umfassenden Überblick über den in der Umweltschutztechnik erreichten Stand geben. Es vermittelt ein sehr breites technikorientiertes Umweltwissen und erleichtert es dem Leser, Querbezüge zu benachbarten Fachbereichen herzustellen. Dem Verlag Springer-Vieweg und hier Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lehnert danken wir für das anhaltende Interesse an diesem Buchprojekt und für viele wertvolle Anregungen.

Hamburg/Hannover, Oktober 2017

Ulrich Förstner und Stephan Köster

Vorwort zur 4. Auflage

Der Erfolg der „Umweltschutztechnik“ machte in rascher Folge nach der korrigierten 3. Auflage eine wesentlich erweiterte 4. Auflage notwendig, die vor allem im Grundlagenteil neu konzipiert wurde, um den Ansprüchen an ein fachübergreifendes *Lehrbuch des ökologisch-technischen Umweltschutzes* zu genügen.

In dieser Querschnittsdisziplin ist in besonderem Maße jener Standardtypus der technischen Fachbildung gefordert, der „als Zwei-Drittel-Experte und wirklicher Generalist ausgewählte Sachbereiche in mehreren Perspektiven begreifen und diese verknüpfen kann“ (*Günter Ropohl* „Technologische Bildung“, Frankfurt/M. 1991). Für die Umweltschutztechnik sind solche Bereiche u.a. das Bauingenieurwesen, verschiedene Verfahrenstechnologien, die Energietechnik, die Messtechnik und die Informatik. Die ökologischen Ansätze und Perspektiven von *Grunddisziplinen der Technik und angewandten Naturwissenschaft* werden im Einführungskapitel beschrieben – zusätzlich zu den bereits in früheren Auflagen umrissenen politischen, rechtlichen und ökonomischen Aspekten des Umweltschutzes.



Dem Bereich *Umwelttechnik im Unternehmen* wurde ein eigenes Kapitel gewidmet. Die Umweltökonomien stehen vor einer neuen Qualität bei der Konzeptentwicklung, denn „wirklich substantielle Beiträge erzwingen ein echtes Eindringen in technische und in naturwissenschaftliche Sachverhalte“ (*Gerd Rainer Wagner* „Unternehmung und ökologische Umwelt“, München 1990). Das vorliegende Buch will hier eine Brücke schlagen, indem es die gängigen Ingenieurmaßnahmen in den verschiedenen Umwelt-

bereichen darstellt (= *Umwelttechnik*), den Nachdruck jedoch auf die medienübergreifenden Ansätze unter besonderer Berücksichtigung ökologischer Kriterien legt (= *Umweltschutztechnik*).

Die immer deutlicheren Hinweise auf die kommende globale Klimakatastrophe und die bereits jetzt dramatisch sich zuspitzende Müllproblematik haben in beiden Bereichen die Entwicklung neuer Technologien und integrierter Strategien verstärkt. Für das Kapitel *Energie und Klima* wurde das 10bändige Studienprogramm der Enquêtekommision „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ ausgewertet. Im Kapitel *Abfall* werden die praktischen Konsequenzen der neuen Verordnungen und Verwaltungsvorschriften (bspw. „TA Abfall“) dargestellt; die Rückverlagerung der Entsorgungsprobleme auf den Produzenten wird künftig der betrieblichen Umwelttechnik eine zentrale Stelle innerhalb der Abfallwirtschaft einräumen.

Hamburg-Harburg, den 15. September 1992

Ulrich Förstner

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----|
| 1 | Grundlagen der Umweltschutztechnik | 1 |
| 1.1 | Leitbilder und Strategien..... | 1 |
| 1.1.1 | Umweltprobleme und Umwelthandeln..... | 4 |
| 1.1.2 | Frühe Denkansätze zu Umwelt und Technik..... | 6 |
| 1.1.3 | Leitbild Nachhaltigkeit..... | 8 |
| 1.1.4 | Umsetzung des Leitbildes Nachhaltigkeit..... | 9 |
| 1.1.5 | Steuerungsebenen für Klimawandel und Energiewende..... | 13 |
| 1.1.6 | Strategische Handlungsfelder – Perspektiven 2020..... | 18 |
| 1.2 | Gesetze und Märkte..... | 20 |
| 1.2.1 | Entwicklung des Umweltrechts in Deutschland..... | 20 |
| 1.2.2 | Maßnahmen zur Umsetzung von umweltpolitischen Zielen..... | 23 |
| 1.2.3 | Innovationen zwischen Technik und Politik..... | 26 |
| 1.2.4 | Instrumente ökologischer Industriepolitik..... | 28 |
| 1.2.5 | Marktperspektiven für Umweltschutztechnologien..... | 29 |
| 1.3 | Ökologische Grundlagen..... | 32 |
| 1.3.1 | Struktur von Ökosystemen..... | 32 |
| 1.3.2 | Stabilität von Ökosystemen und technischen Systemen..... | 33 |
| 1.4 | Technologische Grundlagen..... | 36 |
| 1.4.1 | Risikoforschung..... | 38 |
| 1.4.2 | Umweltinformatik..... | 42 |
| 1.4.3 | Verfahrenstechnik..... | 46 |
| 1.4.4 | Biotechnologie..... | 48 |
| 1.4.5 | Green Chemistry..... | 49 |
| 1.4.6 | Nanotechnologie..... | 50 |
| 1.4.7 | Technische Geochemie..... | 51 |
| 1.4.8 | Ingenieurgeologie und Geotechnik..... | 52 |
| 1.4.9 | Materialwirtschaft und Logistik..... | 53 |
| 1.4.10 | Produktion- und Fertigungstechnik..... | 54 |
| 1.4.11 | Industrielle Symbiose – Ökopark..... | 56 |
| 1.4.12 | Umweltschutztechnik als Querschnittsdisziplin..... | 57 |
| 1.5 | Literatur..... | 59 |
| | | |
| 2 | Nachhaltiges Wirtschaften – Ressourcenschutz | 67 |
| 2.1 | Umweltschutz im Unternehmen..... | 67 |
| 2.1.1 | Einflüsse des Umweltschutzes auf die Unternehmen..... | 69 |
| 2.1.2 | Einsatz ökologieorientierter Managementsysteme..... | 72 |
| 2.2 | Beitrag der Ökonomie zur Nachhaltigen Entwicklung..... | 75 |
| 2.3 | Ressourceneffizienz und nachhaltige Rohstoffpolitik..... | 82 |
| 2.3.1 | Umweltbelastung durch Bergbau..... | 86 |
| 2.3.2 | Ressourceneffizienz und Ressourcenproduktivität..... | 93 |
| 2.3.3 | Umgang mit kritischen Rohstoffen für Zukunftstechnologien..... | 103 |
| 2.4 | Literatur..... | 111 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3 | Schadstoffe | 125 |
| 3.1 | Gefahrstoffrecht, Schadwirkungen..... | 125 |
| 3.1.1 | Gefahrstoffrecht..... | 128 |
| 3.1.2 | Entwicklung und Leitbilder der Chemiewirtschaft..... | 130 |
| 3.1.3 | Schadwirkungen..... | 132 |
| 3.1.4 | Umweltgefährliche Stoffeigenschaften..... | 135 |
| 3.1.5 | Umweltstandards..... | 136 |
| 3.1.6 | Zeitskalen der Schadstoffausbreitung..... | 138 |
| 3.1.7 | Parameter der Stoffdynamik in der Umwelt..... | 139 |
| 3.2 | Schwermetalle..... | 141 |
| 3.2.1 | Umwelttechnische Relevanz..... | 141 |
| 3.2.2 | Herkunft und Wirkung..... | 142 |
| 3.3 | Organische Schadstoffe..... | 144 |
| 3.3.1 | Umwelttechnische Relevanz..... | 144 |
| 3.3.2 | Herkunft und Wirkung..... | 147 |
| 3.4 | Strahlung..... | 151 |
| 3.4.1 | Natürliche Strahlenbelastung..... | 152 |
| 3.4.2 | Künstliche Strahlenbelastung..... | 153 |
| 3.4.3 | Elektrosmog..... | 154 |
| 3.5 | Literatur..... | 155 |
| | | |
| 4 | Klima und Energie | 159 |
| 4.1 | Grundlagen des Klimaschutzes..... | 159 |
| 4.1.1 | Wirkung und Herkunft der Treibhausgase..... | 161 |
| 4.1.2 | Übergang zu einem nachhaltigeren Energiesystem..... | 162 |
| 4.2 | Rationelle Energieerzeugung..... | 164 |
| 4.2.1 | Umwandlung von Energieformen..... | 164 |
| 4.2.2 | Entkarbonisierung..... | 165 |
| 4.2.3 | Kraft-Wärme-Kopplung..... | 166 |
| 4.2.4 | Einsatz von Brennstoffzellen, Energiespeicher..... | 168 |
| 4.2.5 | Erhöhung der Wirkungsgrade von Kraftwerken..... | 170 |
| 4.2.6 | CO ₂ -Sequestrierung – Carbon Capture Storage Technologien..... | 173 |
| 4.3 | Einsparpotenziale bei Treibhausgasen..... | 174 |
| 4.3.1 | Industrie..... | 176 |
| 4.3.2 | Gewerbe, Handel, Dienstleistungen..... | 176 |
| 4.3.3 | Verkehr – Fahrzeugtechnik..... | 177 |
| 4.3.4 | Haushalte – Raumwärme und Geräte..... | 178 |
| 4.3.5 | Gebäude – Vermeidungskostenkurve..... | 180 |
| 4.4 | Erneuerbare Energien..... | 182 |
| 4.4.1 | Technologien: Nutzungsformen und Potenziale..... | 185 |
| 4.4.2 | Geothermie..... | 188 |
| 4.4.3 | Solarthermische Wärmebereitstellung..... | 189 |
| 4.4.4 | Photovoltaik..... | 190 |
| 4.4.5 | Windenergie..... | 192 |
| 4.4.6 | Biomasse..... | 194 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.5 | Instrumente der Energiewende | 200 |
| 4.5.1 | Rechtliche Regelungen | 200 |
| 4.5.2 | Wasserstoff aus Biomasse | 201 |
| 4.5.3 | Stromspeicher | 202 |
| 4.5.4 | Lastmanagement | 203 |
| 4.5.5 | IKT-betriebene Energiesysteme | 204 |
| 4.5.6 | Sektorkopplung von Strom, Wärme und Verkehr | 206 |
| 4.5.7 | World Energy Scenarios: The Grand Transition | 207 |
| 4.6 | Literatur | 208 |
| 5 | Immissionsschutz | 219 |
| 5.1 | Ursachen und Wirkungen von Luftbelastungen | 219 |
| 5.1.1 | Entwicklung bei typischen Luftschadstoffen | 220 |
| 5.1.2 | Luftschadstoffe in der Troposphäre | 220 |
| 5.1.3 | Entstehung von Stickoxiden | 222 |
| 5.1.4 | Entstehung von Schwefeldioxid | 223 |
| 5.1.5 | Reaktionen bei der Ausbreitung von Luftschadstoffen | 224 |
| 5.1.6 | Wirkungen von Luftschadstoffen | 225 |
| 5.2 | Rechtsnormen und Ausbreitungsmodelle | 228 |
| 5.2.1 | Regelbereiche | 228 |
| 5.2.2 | Rechtsnormen und Technische Anleitungen | 229 |
| 5.2.3 | EU-Regelungen für Industrieemissionen | 231 |
| 5.2.4 | Feinstaub/Schwebstaub | 232 |
| 5.2.5 | Ausbreitungsmodelle | 234 |
| 5.3 | Luftreinhaltungstechniken | 235 |
| 5.3.1 | Staubemissionen | 235 |
| 5.3.2 | Verminderung gasförmiger Emissionen | 239 |
| 5.3.3 | Entschwefelung in Kraftwerken | 242 |
| 5.3.4 | Minderung von Stickoxiden | 243 |
| 5.3.5 | Abgasreinigung bei Kraftfahrzeugen | 248 |
| 5.4 | Verkehrslärm | 252 |
| 5.5 | Literatur | 255 |
| 6 | Abwasser | 261 |
| 6.1 | Der urbane Wasserkreislauf | 262 |
| 6.1.1 | Elemente des urbanen Wasserkreislaufs | 262 |
| 6.1.2 | Rechtliche Rahmenbedingungen | 265 |
| 6.2 | Abwässer und ihre Zusammensetzung | 272 |
| 6.2.1 | Abwasseraufkommen und -bilanzierung | 272 |
| 6.2.2 | Abwasserqualitäten und -parameter | 276 |
| 6.3 | Grundlagen der Stadtentwässerung | 279 |
| 6.3.1 | Systeme der Stadtentwässerung | 280 |
| 6.3.2 | Rohrmaterialien, Querschnittsformen, Einbauten und Bauwerke | 288 |
| 6.3.3 | Auslegung von Stadtentwässerungssystemen | 296 |
| 6.3.4 | Betrieb und Instandhaltung von Stadtentwässerungsnetzen | 297 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.4 | Verfahren der Abwasserreinigung..... | 301 |
| 6.4.1 | Übersicht konventionelle Abwasserreinigung..... | 301 |
| 6.4.2 | Mechanische Reinigung..... | 302 |
| 6.4.3 | Biologische Prozesse in der Abwasserreinigung..... | 310 |
| 6.4.4 | Verfahrenstechnische Umsetzung..... | 316 |
| 6.4.5 | „Vierte“ Reinigungsstufe: Sonderverfahren zur weitergehenden Abwasseraufbereitung..... | 328 |
| 6.4.6 | Energieverbrauch von Kläranlagen..... | 335 |
| 6.5 | Behandlung und Entsorgung der Reststoffe aus der Abwasserreinigung..... | 337 |
| 6.5.1 | Reststoffe aus der mechanischen Reinigung..... | 337 |
| 6.5.2 | Schlamm aufkommen und -behandlung..... | 339 |
| 6.6 | Literatur..... | 340 |
| 7 | Trinkwasser | 347 |
| 7.1 | Praxis der Trinkwasserversorgung..... | 348 |
| 7.1.1 | Elemente einer Trinkwasserversorgungsanlage..... | 352 |
| 7.1.2 | Auslegungsgrößen für eine Trinkwasserversorgungsanlage..... | 352 |
| 7.1.3 | Betrieb und Instandhaltung von Wasserversorgungsanlagen..... | 357 |
| 7.2 | Rohwasservorkommen und -gewinnung..... | 359 |
| 7.2.1 | Rohwasserdargebot und -schutz..... | 359 |
| 7.2.2 | Rohwassergewinnung..... | 364 |
| 7.3 | Trinkwasseraufbereitung..... | 381 |
| 7.3.1 | Rahmenbedingungen der Trinkwasseraufbereitung..... | 381 |
| 7.3.2 | Aufbereitungsverfahren und -technologien..... | 382 |
| 7.4 | Trinkwasserverteilung..... | 400 |
| 7.5 | Weitere Aspekte der Trinkwasserversorgung..... | 406 |
| 7.5.1 | Wassersparen: pro und contra..... | 406 |
| 7.5.2 | Konzept des virtuellen Wassers..... | 409 |
| 7.5.3 | Mikroschadstoffe: Handlungsbedarf im Wasserwerk?..... | 411 |
| 7.6 | Literatur..... | 411 |
| 8 | Bodenschutz | 419 |
| 8.1 | Grundlagen und Stand des Bodenschutzes..... | 419 |
| 8.1.1 | Georessource Boden – Themenfelder..... | 422 |
| 8.1.2 | Nachhaltige Landwirtschaft..... | 424 |
| 8.1.3 | Flächenrecycling – nachhaltiges Flächenmanagement..... | 426 |
| 8.1.4 | Art und Ausmaß von Schadstoffeinträgen in Böden..... | 427 |
| 8.2 | Sedimente..... | 430 |
| 8.2.1 | Sedimente, das Gedächtnis der Gewässer..... | 431 |
| 8.2.2 | Biologische Wirkungen..... | 432 |
| 8.2.3 | Chemische Zeitbombeneffekte..... | 433 |
| 8.2.4 | Schwerpunkte aktueller Sedimentforschung..... | 435 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8.3 | Altlastenprobleme | 436 |
| 8.3.1 | Sanierungsziele | 438 |
| 8.3.2 | Erkundung von Altablagerungen und Altstandorten | 439 |
| 8.4 | Altlastensanierung | 442 |
| 8.4.1 | Sicherungsmaßnahmen | 442 |
| 8.4.2 | Sanierung von Altlasten | 447 |
| 8.4.3 | In-situ Methoden | 454 |
| 8.4.4 | Flussgebietsmanagement mit kontaminierten Sedimenten | 461 |
| 8.4.5 | Böden und Sedimente im Flusseinzugsgebiet – Synthese | 464 |
| 8.5 | Literatur | 465 |
| 9 | Abfall | 475 |
| 9.1 | Abfallbeseitigung – vom Abraum bis zum Hausmüll | 475 |
| 9.1.1 | Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen | 476 |
| 9.1.2 | Behandlung von Massenabfällen | 478 |
| 9.1.3 | Chemisch-physikalische Behandlung von Industrieabfällen | 480 |
| 9.1.4 | Hausmüll | 482 |
| 9.1.5 | Abfallaufkommen in Deutschland | 484 |
| 9.2 | Müllverbrennung | 486 |
| 9.2.1 | Müllverbrennungsanlagen | 488 |
| 9.2.2 | Rauchgasreinigung | 490 |
| 9.2.3 | Rückstandsbehandlung | 492 |
| 9.2.4 | Verwertung von Müllverbrennungsschlacken | 494 |
| 9.2.5 | Thermische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland | 495 |
| 9.3 | Deponierung | 496 |
| 9.3.1 | Deponiegas und Sickerwasser | 498 |
| 9.3.2 | Mechanisch-Biologische Vorbehandlung von Abfällen | 501 |
| 9.3.3 | Langzeitprognose für Reaktordeponien | 502 |
| 9.3.4 | Leitperspektive Endlagerqualität | 504 |
| 9.4 | Literatur | 509 |
| 10 | Kreislaufwirtschaft | 517 |
| 10.1 | Integrierte Stoffwirtschaft | 517 |
| 10.1.1 | Entwicklung einer integrierten Abfallwirtschaft in Europa | 517 |
| 10.1.2 | Märkte und Gesetze in der Kreislaufwirtschaft | 518 |
| 10.1.3 | EU-Aktionsplan für eine umfassende Kreislaufwirtschaft | 520 |
| 10.1.4 | Recycling innerhalb der Wertschöpfungskette | 523 |
| 10.1.5 | Theorie und Praxis des Recyclings | 524 |
| 10.1.6 | Formen des Recyclings – Dimensionen der Praxis | 526 |
| 10.1.7 | Prioritäten im System „Kreislaufwirtschaft“ | 528 |
| 10.2 | Stoffstrommanagement | 529 |
| 10.2.1 | Stoffflussanalysen für ein nachhaltiges Materialmanagement | 530 |
| 10.2.2 | Anthropogener Stoffwechsel in urbanen Systemen | 532 |
| 10.2.3 | Energetische Bilanzierung von Stoffkreisläufen | 534 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 10.2.4 | Material- und Energie-Intensität über einen Gebrauchszyklus | 536 |
| 10.2.5 | Vermeidung von Abfällen und Schadstoffen | 537 |
| 10.3 | Recycling in den einzelnen Wirtschaftszweigen | 538 |
| 10.3.1 | BGR-Regelkreis und wirtschaftsstrategische Rohstoffe | 539 |
| 10.3.2 | Verwertung gefährlicher Abfälle – Beispiel: Säurerecycling | 540 |
| 10.3.3 | Aufbereitung von Organikresten – Kompostierung | 542 |
| 10.3.4 | Urban Mining, Recycling von Baumaterialien | 544 |
| 10.3.5 | Werkstoffrecycling – Beispiel Kunststoffe | 547 |
| 10.3.6 | Verwertung von Verpackungsabfällen | 552 |
| 10.3.7 | Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten | 554 |
| 10.3.8 | Altfahrzeug-Verwertung | 555 |
| 10.3.9 | Batterien-Recycling | 556 |
| 10.4 | Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft | 558 |
| 10.4.1 | Produktverantwortung – § 23 im Kreislaufwirtschaftsgesetz | 558 |
| 10.4.2 | Wiederaufarbeitung von Produkten | 560 |
| 10.4.3 | Ersatzbaustoffe zwischen Recycling und Bodenschutz | 562 |
| 10.4.4 | Kreislaufwirtschaft im Zeichen des Klimaschutzes | 564 |
| 10.5 | Literatur | 565 |
| Index | | 577 |

Verzeichnis der Kasten-Themen

Verzeichnis der Kasten-Themen aus Kapitel 1–3

| Kap. | Thema | Seite |
|--------|---|-------|
| 1.1.2 | Das Vorsorgeprinzip im Umweltschutz (aus: 2. Auflage, 1991) | 7 |
| 1.1.5 | Strategiepfade für Nachhaltigkeit im Energiebereich [1.11, 1.47] | 15 |
| 1.1.5 | Verminderung des Klimawandels bis 2050 – Dilemma Kohleausstieg (u.a. Sachverständigenrat für Umweltfragen [1.52]) | 17 |
| 1.2.1 | Lissabon-Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union – Zielrichtung sind die globalen Herausforderungen [1.56] | 22 |
| 1.2.2 | Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik bezogen auf Anlagen (Anhang zu § 3 des Bundesimmissionsschutzgesetzes) | 25 |
| 1.2.3 | Umweltschädliche Subventionen in Deutschland – Primär- und Sekundäreffekte (<i>Köder u.a.</i> , Umweltbundesamt [1.63]) | 27 |
| 1.3.2 | Biologische Vielfalt und Ökosystemdienstleistungen [1.80-1.82] | 35 |
| 1.4.1 | Acht Grundregeln für überlebensfähige Systeme (<i>Vester</i> [1.88]) | 35 |
| 1.4.2 | Prozessleittechnik überwacht und automatisiert Verfahren [1.113] | 45 |
| 1.4.11 | Umweltgerechte Produktgestaltung – Integrierte Produktpolitik (EU-Kommission [1.134], EU-Grünbuch [1.135], <i>Rubik</i> [1.136]) | 55 |
| 1.4.12 | Trends und Tendenzen im Umweltbewusstsein (<i>Schipperges u.a.</i> , Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung Berlin [1.145]) | 58 |
| 2.1.1 | Studien und Broschüren zum Thema „Nachhaltiges Wirtschaften“ ([2.13-2.18]; CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz [2.19]) | 70 |
| 2.1.2 | Prozessintegration im Umweltschutzmanagement (EMAS [2.27]; Umweltgutachter, Rechts- und Verwaltungsvorschriften [2.31]) | 74 |
| 2.2 | Nachhaltiges Wirtschaften in den Grenzen der natürlichen Tragfähigkeit (Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2017 [2.47]) | 81 |
| 2.3.1 | Wismut/Uran: Von Georgius Agricola (1556; <i>Naumann</i> [2.72]) bis „Pechblende“ (1988; <i>Beleites</i> [2.76]); Wismut-Altlasten [2.75] | 87 |
| 2.3.1 | Katastrophale Dammbürche von Bergbau-Absetzbecken – Potosi (1626 [2.108]) bis Bento Rodrigues/Brasilien (2016 [2.116]) | 91 |
| 2.3.2 | Alternativen bei der Verwendung seltener Rohstoffe (Beispiele aus China, Deutschland, Japan, UK und USA [2.157]) | 95 |
| 3.1.5 | Gesundheits- und umweltrelevante Eigenschaften der Abfälle („Anhang III“; u.a. Definition „ökotoxisch“ [3.34]) | 137 |
| 3.3.2 | Abbaubarkeit von organischen Schadstoffen (Dechema Altlastensanierung „Natural Attenuation“, <i>Track/Michels</i> [3.58]) | 149 |

Verzeichnis der Kasten-Themen aus Kapitel 4–7

| Kap. | Thema | Seite |
|-------|---|-------|
| 4.1 | Climate Change – Geschichte einer wissenschaftlichen Konsensbildung (<i>Oreskes</i> “Beyond the Ivory Tower“ [4.1]) | 160 |
| 4.1.2 | Klimawandel in Deutschland (Springer/Spektrum 2017 [4.15]) | 163 |
| 4.2.4 | Elektromobilität – Erwartungen für künftige Veränderungen der Wertschöpfung im Kraftfahrzeug-Sektor (<i>Winterhagen</i> [4.41]) | 169 |
| 4.4 | Gestaltungsoptionen für das Stromsystem, Teil I: (1) Einfluss der CO ₂ -Minderungsziele, (2) Stromsystem mit 100 % Erneuerbaren (Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ [4.95]) | 184 |
| 4.4.4 | Fakten zur Photovoltaik in Deutschland – Kosten, Arbeitsplätze (Fraunhofer Institut für Solare Energieanlagen, <i>Wirth</i> [4.122]) | 191 |
| 4.4.6 | Gestaltungsoptionen für das Stromsystem, Teil II: (3) Zentrale/dezentrale Erzeugung, (4) Speicher (Akademienprojekt [4.95]) | 199 |
| 4.5.5 | Werkstoffe und Materialien für die Energiewende – Bedeutung der Designphase (acatech-Materialien, <i>Bolt u.a.</i> [4.160]) | 205 |
| 4.5.5 | Das Energiesystem resilient gestalten – Szenarien, Handlungsspielräume, Zielkonflikte (Akademienprojekt, <i>Renn</i> [4.161]) | 205 |
| 5.3.5 | Stickoxide aus Dieselmotoren – NO _x Real Driving Emissions (Verordnung [EU] 2016/646 [5.73], Umsetzung [5.74-5.83]) | 251 |
| 6.1.2 | Übersicht über wichtige wasserrechtliche Regelungen und Vorgaben | 266 |
| 6.2.1 | Abwasseraufkommen in Deutschland in 2013 | 276 |
| 6.3 | Kennzahlen zur öffentlichen Kanalisation in Deutschland [6.19] | 280 |
| 6.3.1 | Warum fiel die Wahl auf die Schwemmkanalisation? | 280 |
| 6.4.2 | Oberflächenbeschickung q _a | 307 |
| 6.4.3 | Mikroorganismen und ihre Energiequellen | 311 |
| 7.1 | Multibarrierensystem in der (deutschen) Trinkwasserversorgung | 349 |
| 7.1 | Rechtliche Grundlagen der Trinkwasserversorgung | 350 |
| 7.1.3 | Exkurs: Wasserpreise | 358 |
| 7.2.1 | Wasserdargebot und Rohwassernutzung in Deutschland | 360 |
| 7.2.2 | Stickstoff- bzw. Nitratproblematik | 369 |
| 7.3.5 | Wichtige Größen bei der Entsäuerung | 395 |
| 7.4 | Rohrnetzlängen in Deutschland und ausgesuchten Städten (öffentliche Verteilungsnetze) | 402 |

Verzeichnis der Kasten-Themen aus Kapitel 8–10

| Kap. | Thema | Seite |
|--------|--|-------|
| 8.1 | Warum Europa keine Bodenschutzrahmenrichtlinie besitzt [8.8] | 421 |
| 8.1.1 | Weiterentwicklung von Technologien der Bodenbewirtschaftung (Empfehlungen für die „Geoessource Boden“, <i>acatech</i> [8.18]) | 423 |
| 8.4.3 | Rechtliche Aspekte beim Einsatz der Methode des Natürlichen Rückhalts und Abbaus an Boden- und Sedimentaltlasten [8.123] | 459 |
| 8.4.4 | Sanierung großer Sedimentaltlasten – Beispiele aus den USA: Hudson River (PCB [8.139]) und Passaic River (Dioxin [8.141]) | 463 |
| 9.1.1 | Langzeit-Ökoinventar von Bergbauabfällen – Buntmetalltailings (Studie des Bundesamtes für Umweltschutz Bern, <i>Doka</i> [9.17]) | 477 |
| 9.1.2 | Merkblatt „Umgang mit Baggergut“: Fallbeispiele aus Hamburg | 479 |
| 9.1.3 | Beste Verfügbare Technik (BVT) für Abfallbehandlungsanlagen (Sachstandsbericht zur Merkblattbearbeitung, <i>Butz</i> [9.23]) | 481 |
| 9.2.2 | BVT-Merkblatt „Abfallverbrennung“ – Rauchgasreinigung (Bericht über einen „Sevilla-Prozess“, <i>Gleis</i> [9.47]) | 491 |
| 9.3 | Überwachungspläne für Deponien nach der EU/IE-Richtlinie („Industrieemissionen“ [9.25], Beispiel Niedersachsen [9.78]) | 497 |
| 9.3.3 | Langzeitverhalten von organischen Substanzen in Deponien | 503 |
| 9.3.4 | Hochradioaktive Abfälle: Endlagerbergwerk mit Reversibilität | 508 |
| 10.1.1 | Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen [10.3] | 519 |
| 10.2.2 | “Metabolism of the Anthroposphere” – vier Szenarien: Phosphor, Urban Mining, Plastik und Mobilität (<i>Baccini/Brunner</i> [10.30]) | 533 |
| 10.3.2 | Rückführung statt „Verklappung“: Schwefelsäure aus der TiO ₂ -Produktion (Sachtleben-Chemie/Huntsman [10.79, 10.80]) | 541 |
| 10.3.5 | Chemische Reaktionen beim stofflichen Recycling von Kunststoffen – Pyrolyse vs. Hydrolyse (<i>Kaminsky/Sinn</i> [10.109]) | 551 |
| 10.3.6 | Verwertung von Verpackungsabfällen: Private Systeme [10.115] | 553 |
| 10.3.9 | Beste Verfügbare Technik für die Verwertung von Batterien – Lösungsalternativen am Beispiel Cadmium (<i>Rentz</i> [10.135]) | 557 |
| 10.4.1 | „Das Produkt-Design ist die zentrale Stelle im Produktsystem“ Thesen zur Fortentwicklung der Produktverantwortung [10.138] | 559 |
| 10.4.1 | “Extended Producer Responsibility“ – Fallstudienvergleich unter den Mitgliedstaaten der Europäischen Union [10.145] | 559 |
| 10.4.2 | Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke (<i>Walther</i> [10.147]) | 561 |
| 10.4.2 | Refurbishing und Refabrikation als Lösungswege zur ressourcen-effizienten Produktion (<i>Steinhilper/Butzer</i> [10.155-10.158]) | 561 |
