

Sven Linow

Energie – Klima – Ressourcen

Quantitative Methoden zur Lösungs-
bewertung von Energiesystemen



HANSER

Linow

Energie – Klima – Ressourcen



Blieben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Sven Linow

Energie – Klima – Ressourcen

Quantitative Methoden zur
Lösungsbewertung von Energiesystemen

Mit 55 Abbildungen und 74 Tabellen

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Sven Linow, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau und Kunststofftechnik,
Lehrstuhl Thermodynamik und Umwelttechnik



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. 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.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Björn Gallinge

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelillustration: © [shutterstock.com](https://www.shutterstock.com/)/Blue Planet Studio

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46270-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-46278-6

Inhalt

| | |
|---|-------------|
| Vorwort | XIII |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Zielgruppe | 2 |
| 1.2 Kompetenzen | 3 |
| 1.3 Kernthesen | 7 |
| 1.4 Aufbau | 8 |
| 1.5 Dank | 11 |
| 1.6 Literatur | 13 |
| 2 Probleme und Lösungen | 15 |
| 2.1 Probleme | 16 |
| 2.2 Die wissenschaftliche Methode | 19 |
| 2.2.1 Definition | 20 |
| 2.2.2 Wissenschaftliche Texte lesen und verstehen | 21 |
| 2.2.3 Wahrscheinlichkeit und Sicherheit | 22 |
| 2.2.4 Verlässliche Quellen erkennen | 23 |
| 2.2.5 In der Politik | 28 |
| 2.3 Gesellschaftliche Aspekte technischer Veränderungen | 28 |
| 2.4 Umwelt und Technik | 30 |
| 2.5 Analysieren und Bewerten | 33 |
| 2.6 Entscheidungsräume | 36 |
| 2.7 Haltungen | 37 |
| 2.8 Literatur | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Energie und Stoff | 41 |
| 3.1 | Systeme und Systemgrenzen | 41 |
| 3.2 | Energetische Zustandsgrößen | 43 |
| 3.3 | Energetische Prozessgrößen | 45 |
| 3.3.1 | Zustandsänderung | 45 |
| 3.3.2 | Energieerhaltung | 47 |
| 3.3.3 | Wärme | 48 |
| 3.3.4 | Arbeit und Leistung | 49 |
| 3.3.5 | Größenordnung und Maßeinheit der Energie | 50 |
| 3.4 | Entropie und zweiter Hauptsatz | 54 |
| 3.5 | Stoffe beschreiben | 57 |
| 3.5.1 | Ideales Gas | 59 |
| 3.5.2 | Gase bei Normbedingung | 60 |
| 3.5.3 | Ideale Flüssigkeit | 60 |
| 3.6 | Energiewandlung | 61 |
| 3.6.1 | Wirkungsgrad | 61 |
| 3.6.2 | Umwandlung von Wärme in Arbeit | 62 |
| 3.6.3 | Umwandlung von Arbeit in Arbeit | 63 |
| 3.6.4 | Umwandlung von Arbeit in Wärme | 64 |
| 3.6.5 | Druckverlust | 65 |
| 3.7 | Wärmeübertragung | 70 |
| 3.8 | Optische Strahlung | 71 |
| 3.8.1 | Definition und Grundlagen | 71 |
| 3.8.2 | Spektrale Emission – Planck’sches Gesetz | 74 |
| 3.8.3 | Die gesamte Emission – Stefan-Boltzmann-Gesetz | 75 |
| 3.8.4 | Wien’sches Verschiebungsgesetz | 77 |
| 3.8.5 | Strahlungstransport | 77 |
| 3.8.6 | Absorption und Streuung | 79 |
| 3.8.7 | Strahlung und Entropie | 80 |
| 3.9 | Literatur | 81 |
| 4 | Infrastruktur und Technik beschreiben | 83 |
| 4.1 | Lebenswegbetrachtung | 83 |
| 4.1.1 | Produktlebensweg und Systemgrenze | 83 |
| 4.1.2 | Nutzungsphase | 89 |
| 4.1.3 | Lebensende | 91 |
| 4.2 | Ökobilanz (LCA) | 93 |
| 4.3 | Ressourcen | 94 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4 | Ressourceneinsatz | 98 |
| 4.4.1 | Reserven und Ressourcen endlicher Rohstoffe | 99 |
| 4.4.2 | Reichweite | 101 |
| 4.4.3 | Peak-X | 103 |
| 4.5 | Entwicklungsstand einer Technik | 107 |
| 4.6 | Risiko | 110 |
| 4.7 | Literatur | 115 |
| 5 | Wachstum | 117 |
| 5.1 | Definition von Wachstum | 117 |
| 5.2 | Konstante Wachstumsrate | 118 |
| 5.3 | Integrale | 121 |
| 5.4 | Näherung für kleine Änderungsraten | 121 |
| 5.5 | Was kann wachsen? | 124 |
| 5.6 | Kosten-Nutzen-Analyse | 129 |
| 5.7 | Nichtexponentielles Wachstum | 134 |
| 5.8 | Literatur | 135 |
| 6 | Energetische Kennzahlen | 137 |
| 6.1 | Qualität der Energie | 137 |
| 6.2 | Maximale Leistung oder maximale Effizienz | 139 |
| 6.3 | Nennleistung | 143 |
| 6.4 | Wirkungsgrad | 143 |
| 6.5 | Kennzahlen für Kraftwerke ermitteln | 144 |
| 6.6 | Nutzungsgrad | 147 |
| 6.6.1 | Kraftwerke | 147 |
| 6.6.2 | Fahrzeuge | 150 |
| 6.7 | Lebensweg | 151 |
| 6.7.1 | Extraktion von Energierohstoffen | 151 |
| 6.7.2 | Vorbereitung für die Aufbereitung | 152 |
| 6.7.3 | Raffinerien und andere Veredelungsprozesse | 153 |
| 6.7.4 | Transport der Sekundärenergieträger | 154 |
| 6.7.5 | Energiewandlung und Kraftwerke | 155 |
| 6.7.6 | Urformen und Halbzeuge | 156 |
| 6.7.7 | Verarbeitungsprozesse | 159 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.8 | Kumulierter Energieaufwand (KEA) | 160 |
| 6.8.1 | Definitionen | 160 |
| 6.8.2 | Methode | 163 |
| 6.8.3 | KEA von Kraftwerken | 165 |
| 6.8.4 | Abbruchbedingungen bei der Berechnung des KEA | 166 |
| 6.8.5 | Einfache KEA-Abschätzung | 166 |
| 6.8.6 | KEA menschlicher Tätigkeiten | 167 |
| 6.8.7 | KEA von Finanzdienstleistungen | 170 |
| 6.8.8 | Material- und Energiefluss-Analyse | 170 |
| 6.9 | Primärenergie | 172 |
| 6.10 | Net-Energy | 173 |
| 6.11 | Energy Returned on Energy Invested (EROI) | 175 |
| 6.11.1 | EROI für Energieträger | 175 |
| 6.11.2 | Methode | 176 |
| 6.11.3 | Kraftwerk - EROI | 178 |
| 6.11.4 | Energy-Payback-Zeit | 180 |
| 6.11.5 | Ziel und Zeitpunkt der Berechnung | 180 |
| 6.11.6 | Interpretation des EROI | 181 |
| 6.11.7 | Energieklippe | 190 |
| 6.12 | Energie und Geld | 192 |
| 6.13 | Literatur | 193 |
| 7 | Energiewende und nachhaltige Entwicklung – die Aufgabe | 195 |
| 7.1 | Die Energiewende | 195 |
| 7.2 | Technische Herausforderungen | 201 |
| 7.3 | Bewertung zukünftiger Möglichkeiten | 206 |
| 7.4 | Nachhaltige Entwicklung | 209 |
| 7.5 | Sustainable Development Goals und Energie | 211 |
| 7.5.1 | Erste Ebene – die Biosphäre | 211 |
| 7.5.2 | Zweite Ebene – Menschen und die Gesellschaft | 214 |
| 7.5.3 | Dritte Ebene – Ökonomie | 219 |
| 7.5.4 | Resilienz | 222 |
| 7.6 | Planetare Grenzen | 224 |
| 7.7 | Paradigmen nachhaltiger Entwicklung | 226 |
| 7.8 | Nachhaltige Entwicklung messen | 229 |
| 7.8.1 | Vergleichende Bewertung – VDI 4605 | 229 |
| 7.8.2 | Systemische Betrachtung | 230 |
| 7.9 | Industrielle Erderwärmung | 231 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.10 | Superboshafte Probleme | 237 |
| 7.11 | Digitalisierung | 239 |
| 7.11.1 | Solutions | 239 |
| 7.11.2 | Digitale Technik als System | 240 |
| 7.11.3 | Digitalisierung und Effizienz | 244 |
| 7.11.4 | Digitalisierung und SDGs | 245 |
| 7.11.5 | Digitale Werkzeuge | 247 |
| 7.12 | Warum Energiewende jetzt? | 251 |
| 7.13 | Zieldefinition – wann haben wir die Energiewende geschafft? | 254 |
| 7.14 | Literatur | 257 |
| 8 | Das System Erde | 259 |
| 8.1 | Die Erde als Planet – Energiebilanz | 259 |
| 8.2 | Lokale solare Einstrahlung | 265 |
| 8.3 | Erde als System – Entropiebilanz | 265 |
| 8.4 | Prozesse in der Atmosphäre | 266 |
| 8.5 | Wasserkreislauf | 271 |
| 8.6 | Treibhauseffekt | 273 |
| 8.6.1 | Solare Einstrahlung und Abstrahlung vom Erdboden | 274 |
| 8.6.2 | Das natürliche Klimaregime | 277 |
| 8.6.3 | Treibhausgase | 278 |
| 8.6.4 | Zeitabhängigkeit | 281 |
| 8.7 | Effizienz der Photosynthese und Pflanzenwachstum | 286 |
| 8.8 | Energiebedarf von Lebewesen | 290 |
| 8.9 | Der Mensch im System Erde | 291 |
| 8.9.1 | Anthropozän | 291 |
| 8.9.2 | Nahrung und Fläche | 292 |
| 8.9.3 | Die Technosphäre | 294 |
| 8.9.4 | Menschliche Entropieerzeugung im System Erde | 295 |
| 8.10 | Literatur | 301 |
| 9 | Bereitstellen von Wärme | 303 |
| 9.1 | Anwendung der Wärme in der Technik | 303 |
| 9.2 | Einsatz von Brennstoffen und technische Verbrennung | 306 |
| 9.2.1 | Heizwert und Brennwert | 306 |
| 9.2.2 | Maximale Temperatur der Verbrennung | 309 |
| 9.2.3 | Feuerungstechnischer Wirkungsgrad | 310 |
| 9.2.4 | Sauerstoffbedarf und Luftbedarf | 312 |

| | | |
|--|---|------------|
| 9.3 | Brennstoffe | 316 |
| 9.3.1 | Nutzung der Brennstoffe zur Erzeugung von Arbeit | 316 |
| 9.3.2 | Organische Brennstoffe – Rückblick | 318 |
| 9.3.3 | Fossile Brennstoffe heute | 321 |
| 9.3.4 | Organische Brennstoffe – Ausblick | 327 |
| 9.3.5 | Kunstdünger | 331 |
| 9.4 | Kerntechnik | 336 |
| 9.4.1 | Kernspaltung | 336 |
| 9.4.2 | Kernfusion | 338 |
| 9.5 | Solarthermie | 339 |
| 9.5.1 | Kollektor ohne Konzentrator | 339 |
| 9.5.2 | Solarthermie mit Konzentrator | 340 |
| 9.6 | Kältemaschine und Wärmepumpe | 344 |
| 9.7 | Geothermie und Erdwärme | 347 |
| 9.8 | Elektrowärme | 348 |
| 9.9 | Literatur | 348 |
| 10 Umwandlung mechanischer Leistung | | 351 |
| 10.1 | Wasserkraft | 351 |
| 10.1.1 | Grundlagen | 351 |
| 10.1.2 | Technische Lösungen | 354 |
| 10.1.3 | Wasserkraft im System Erde | 355 |
| 10.1.4 | Meeresströmungen | 360 |
| 10.1.5 | Gezeitenkraftwerke | 361 |
| 10.2 | Windkraft | 365 |
| 10.2.1 | Nutzbare kinetische Energie | 365 |
| 10.2.2 | Aufstellung von Windrädern | 368 |
| 10.2.3 | Wind beschreiben | 370 |
| 10.2.4 | Wohin mit den Windrädern? | 373 |
| 10.2.5 | Kleine oder große Windturbinen | 375 |
| 10.3 | Literatur | 376 |
| 11 Direkte Erzeugung von Arbeit oder Elektrizität | | 377 |
| 11.1 | Thermodynamisches Limit der Nutzung solarer Strahlung | 377 |
| 11.2 | Photovoltaik | 378 |
| 11.3 | Wirkungsgrad der Photovoltaik | 382 |
| 11.4 | Anforderungen an Photovoltaikanlagen | 384 |
| 11.5 | Wichtige Varianten | 385 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 11.6 | EROI der Photovoltaik | 388 |
| 11.7 | Kleine oder große PV-Anlagen | 390 |
| 11.8 | Aufstellung von PV-Anlagen | 390 |
| | 11.8.1 Lokale Intensität außerhalb der Atmosphäre | 390 |
| | 11.8.2 Einfluss der Atmosphäre | 392 |
| | 11.8.3 Regionales Klima und Wetter | 393 |
| | 11.8.4 Ausrichtung der Module | 394 |
| | 11.8.5 Flächennutzung | 395 |
| 11.9 | Intermittenz der Photovoltaik | 396 |
| 11.10 | Thermoelektrik | 399 |
| 11.11 | Literatur | 403 |
| 12 | Energie speichern | 405 |
| 12.1 | Bisherige Energiespeicher | 405 |
| 12.2 | Kennzahlen für Speicher | 407 |
| 12.3 | Speicher und EROI | 411 |
| 12.4 | Kinetische Energie speichern | 412 |
| 12.5 | Elektrizität speichern | 412 |
| | 12.5.1 Pumpspeicherkraftwerke | 412 |
| | 12.5.2 Druckluftspeicher | 415 |
| | 12.5.3 Batterien | 420 |
| | 12.5.4 Power-to-X | 421 |
| 12.6 | Speicher, EROI und Curtailing | 423 |
| 12.7 | Wärmespeicher | 426 |
| 12.8 | Literatur | 430 |
| 13 | Abgasreinigung | 433 |
| 13.1 | Emissionen und energetische Kosten | 433 |
| | 13.1.1 Staub und Asche | 433 |
| | 13.1.2 Schwefel | 435 |
| | 13.1.3 Kohlenmonoxid | 437 |
| | 13.1.4 Stickoxide | 437 |
| | 13.1.5 Kohlenwasserstoffe | 439 |
| | 13.1.6 Andere Elemente | 439 |
| | 13.1.7 Weitere Verbindungen | 440 |
| 13.2 | Emissionsgrenzwerte | 440 |
| | 13.2.1 Motivation | 440 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 13.2.2 | Bezugssauerstoff | 441 |
| 13.2.3 | Verlust an Lebenszeit (YOLL) | 441 |
| 13.3 | Treibhausgase | 444 |
| 13.4 | Geoengineering | 449 |
| 13.4.1 | Die eingestrahlte Energie verringern | 451 |
| 13.4.2 | Die Abstrahlung erhöhen | 457 |
| 13.4.3 | Emissionen verhindern | 458 |
| 13.4.4 | Emissionen umwandeln | 459 |
| 13.4.5 | Geoengineering planen | 460 |
| 13.5 | Carbon Capture and Storage (CCS) | 461 |
| 13.5.1 | Energetischer Aufwand des Auffangens von Treibhausgasen | 461 |
| 13.5.2 | Energetischer Aufwand für das Einlagern | 462 |
| 13.5.3 | Kohlendioxid einfangen und entsorgen | 463 |
| 13.5.4 | Transport | 464 |
| 13.5.5 | Rolle von CCS | 469 |
| 13.6 | Literatur | 471 |
| 14 | Wie geht es weiter? | 473 |
| 14.1 | Szenarien | 473 |
| 14.2 | Erwartungen an neue Technik | 476 |
| 14.3 | Transformation oder Disruption? | 478 |
| 14.4 | Energiekannibalismus und Energiewende | 479 |
| 14.5 | Nachhaltige Energieversorgung | 483 |
| 14.6 | Krisen bewältigen | 486 |
| 14.7 | Anfangen | 489 |
| 14.8 | Literatur | 490 |
| 15 | Anhänge | 493 |
| 15.1 | Konstanten | 493 |
| 15.2 | Vorsätze für Einheiten | 494 |
| 15.3 | Vorsätze für Konzentrationen | 494 |
| 15.4 | Formelzeichen – lateinische Buchstaben | 494 |
| 15.5 | Formelzeichen – griechische Buchstaben | 497 |
| 15.6 | Die Elemente | 498 |
| Index | | 503 |

Vorwort

Wollen wir unsere Zukunft im Rahmen des Möglichen selbst gestalten oder lassen wir sie einfach über uns kommen? Dies ist die Frage, die gerade mit großem Aufwand in das Zentrum unserer Gesellschaft gerückt wird. Direkt daran schließt die Frage an, welche Möglichkeitsräume für eine aktive Gestaltung haben wir heute?

Die gesellschaftliche Diskussion befindet sich dabei in einem Findungsprozess: Auf der einen Seite dominieren Stimmen, die fest im Vertrauen auf die Magie des Fortschrittes verankert sind: Dieser solle aus sich selbst heraus zu einer gegebenen Zeit einfach alle Probleme lösen. Dieses Ereignis werde stattfinden, wenn der Fortschritt ganz ohne aktive Unterstützung, Steuerung oder Lenkung durch den Staat oder die Gesellschaft aus sich selbst heraus die Lösung erzeugt. Auf der anderen Seite finden sich Forderungen nach einem schnellen und proaktiven Gestalten der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, in denen aktiv gemeinsam gerechte Lösungen entwickelt werden. Gleichzeitig sind viele Argumente durch den Verzicht auf belegbare sachliche Begründung und quantitative Beweisführungen geprägt.

In dem Glauben des „Sie-Werden-Eine-Lösung-Finden“ sind „Sie“ die heutigen und zukünftigen Ingenieurinnen und Ingenieure: Das Ziel jeder Ingenieursausbildung ist es, die konsequente Verwendung von quantitativen Methoden und sachlichen Begründungen zu vermitteln. Kernkompetenzen guter Ingenieurinnen und Ingenieure sind der Umgang mit Zahlen und die Befähigung, Entscheidungen anhand sachlich und quantitativ begründbarer Argumente zu treffen. Wer von uns wollte schon in ein Flugtaxi steigen, dessen Design ohne Beachtung von (technischen) Regeln ausgeführt wurde und nur auf Vertrauen in den Fortschritt beruht (wenn es ein Problem im Flug gibt, dann wird sich spontan aus dem Nichts eine Lösung entwickeln).

An dieser Stelle setzt dieses Buch an und möchte in den aktuellen Sachstand zu den Möglichkeitsräumen einer zukünftigen Energieversorgung einführen und quantitative Methoden darstellen, die es uns erlauben, mit belastbaren Zahlen zu argumentieren. Dabei ist verstanden, dass der Rahmen in dem eine zukünftige Technologie machbar ist, durch Naturgesetze, durch das System Erde und den darin verfügbaren Ressourcen, sowie durch die Rahmenbedingungen innerhalb derer

eine technisch entwickelte und gerechte menschliche Gesellschaften möglich bleibt, beschränkt ist und das technische Entwicklung in diesem Rahmen gesellschaftlich gestaltet werden kann.

„Zurzeit demonstrieren regelmäßig viele junge Menschen für Klimaschutz und den Erhalt unserer natürlichen Lebensgrundlagen. Als Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erklären wir auf Grundlage gesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse: Diese Anliegen sind berechtigt und gut begründet. Die derzeitigen Maßnahmen zum Klima-, Arten-, Wald-, Meeres- und Bodenschutz reichen bei weitem nicht aus.“ (<https://www.scientists4future.org/>).

Ich hoffe, dass wir beginnen, mit der notwendigen Ernsthaftigkeit unseres Denkens und Angemessenheit unseres Handelns unsere drängenden Probleme anzunehmen. Damit können wir unsere Zukunft selbst gestalten – die Alternative einer Lösung durch Desaster, wie sie durch reines Warten auf „Fortschritt“ schnell wahrscheinlicher wird, erscheint mir völlig unangemessen. Helfen wir dem Neuen, geboren zu werden und seien wir bereit, Altes gehen zu lassen.

Darmstadt, September 2019

1

Einführung

Wozu ist dieses Buch da? Was ist neu, was ist anders? Wo kommt es her, welche Ziele hat der Autor? An wen richtet es sich und was kann man damit machen?

Ingenieurinnen und Ingenieure werden unsere zukünftige Energietechnik entwickeln, planen, konkrete Projekte zur Installation durchführen und überwachen, sowie Wartung, Instandhaltung und Änderungen vorsehen und begleiten. Die weitere Verfügbarkeit von günstiger Energie ist eine grundlegende Voraussetzung für das Weiterbestehen unserer Gesellschaft, erst durch sie werden die Herstellung, der Betrieb und die Entsorgung unserer gesamten Technik möglich (Smil 2017). Gleichzeitig ändern sich mit und ohne Energiewende gerade die Rahmenbedingungen für diese Energietechnik. Auch viele andere Entscheidungsräume der Gesellschaft und damit für die Technik verschieben sich. Diese Situation ist der Gegenstand dieses Buches. Das Ziel ist es, Werkzeuge und Fähigkeiten zu vermitteln, die es heutigen und zukünftigen Ingenieuren ermöglichen, ihre Aufträge möglichst klar zu beschreiben, ihren Handlungs- und Entscheidungsraum gut zu erkennen und damit möglichst gut belastbare Entscheidungen zu treffen. Das Buch richtet sich an alle technischen Disziplinen, da jede für ihren Bereich neben der eigenen disziplinären Expertise auch gemeinsame grundlegende Kompetenzen benötigt: Ingenieure brauchen ein tiefes fachliches Wissen zusammen mit einer breiten überfachlichen Basis, auf der sie arbeiten. Daher liefert es eine breite, über die Grenzen der Technik reichende Expertise, um in den hier vertieften Themenbereichen handlungs- und entscheidungsfähig zu sein.

Das Buch fokussiert dabei auf den Zusammenhang zwischen den drei als zentral für die Zukunft unserer Gesellschaft angesehenen Faktoren, der zukünftigen Energietechnik selber, der Ressourcenbereitstellung für diese Energietechnik und der stattfindenden Erderwärmung. Die großen Veränderungen dieser drei Faktoren werden die Anforderungen an und den Möglichkeitsraum für Technik für unsere zukünftige Entwicklung stark beeinflussen:

- Es werden zukünftig regenerative Primärenergieträger die Bereitstellung von Energie für die Gesellschaft ermöglichen müssen. Dies bringt große Änderungen für die gesamte technologische Basis und für die Formen der gesellschaftlich

möglichen Nutzung von Energie mit sich. Für Ingenieurinnen und Ingenieure, die diese Technik gestalten, ist es daher wichtig, die Änderungen und neuen Anforderungen zu verstehen, um darauf in ihrer Tätigkeit angemessen reagieren zu können.

- Der Aufwand für die Bereitstellung von neuen Rohstoffen steigt an, bestimmte Rohstoffe stehen nicht in den für die globale technische Umsetzung aller neuen Ideen benötigten Mengen bereit. Gleichzeitig erfordert moderne Technik oft sehr spezielle Materialien aus teilweise seltenen Rohstoffen. Ingenieurinnen und Ingenieure benötigen grundlegende Ideen, wie sich dies in der Zukunft entwickeln kann, um daraus gute Ansätze auswählen zu können.
- Die sich aktuell schnell beschleunigende Verschiebung des globalen Klimas verändert den Raum des Möglichen für technische Gestaltung, sie erfordert neue technische Handlungsweisen. Sie beeinflusst die Nutzung aller Primärenergieträger global. Gleichzeitig verlangt sie neue technische Lösungen für eine Anpassung an die Auswirkungen.

Diese hier technisch formulierten Problembereiche haben starke gesellschaftliche Rückwirkungen, die zusätzlich mit beeinflussen und einschränken, was zukünftig möglich sein kann.

■ 1.1 Zielgruppe

Dieses Buch richtet sich zuerst an Lernende. Eingeflossen sind viele Diskussionen und persönliche Eindrücke von dem, was Studentinnen und Studenten unterschiedlicher Disziplinen tatsächlich an Kompetenzen und Wissen in das Bachelorstudium mitbringen. Nutzer werden feststellen, dass sie einzelne der Themenfelder bereits kennen und einige der Methoden auch schon anwenden können, vielleicht haben sie einiges in einem anderen Zusammenhang oder in anderer Form gelernt. Da dieses Buch sich konkret an Studentinnen und Studenten technischer Studiengänge im Bachelor wendet, sind viele Themen einführend dargestellt und werden in der angegebenen Fachliteratur weiter vertieft. Das zweite Kapitel ist eigentlich eine Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten, dies erschien notwendig, da im Bachelor dieses Rüstzeug sehr unterschiedlich gut vermittelt wird und vorhanden ist. Allerdings ist wissenschaftliches Arbeiten eine wichtige Voraussetzung, um in den hier dargestellten Themen durch den Dschungel an Behauptungen hindurch zu belastbarem Grund zu gelangen. Auch der Fokus auf sehr große, globale Probleme und große Zahlen in den Beispielen ist bewusst gewählt, da dies kaum an anderer Stelle im Studium erfahrbar gemacht werden kann und der Umgang mit großen Zahlen eigene Schwierigkeiten hervorruft.

Genutzt werden kann und soll dieses Buch von jedem, der tiefer in das Thema einsteigt und konkret eigene Fragestellungen analysieren oder selber kompetent in Sachdiskussionen mitwirken will. Es schließt dabei bewusst oberhalb allgemeinverständlicher nichtmathematischer Darstellungen an (Perkins 2017), denn hier soll echte Handlungsfähigkeit erreicht werden und diese benötigt als Kompetenz das eigene Berechnen. Die verwendete Mathematik geht durchgängig nicht über das Niveau eines Grundkurses in Mathematik in der gymnasialen Oberstufe hinaus. Dieses Niveau ist für alle Studentinnen und Studenten an Hochschulen für angewandte Wissenschaft unabhängig von ihrem tatsächlichen Bildungsweg zugänglich. Zusätzlich dann richtet sich das Buch an Lehrende, die wie der Autor vor der Aufgabe stehen, eine allgemein gehaltene Einführung in das Themenfeld der Umweltauswirkung von Technik zu gestalten. Dieses Buch kann Ihnen einen möglichen Ansatz zeigen. Eingeflossen sind Sichtweisen aus dem Maschinenbau, der Kunststofftechnik, dem Elektroingenieurwesen und dem klassischen Umweltingenieurwesen mit seinem Fokus auf Ver- und Entsorgung. Dazu kommen Diskussionen aus der Energiewirtschaft und vielen gesellschaftswissenschaftlichen Studiengängen. Der Umfang des enthaltenen Lernmaterials ist deutlich zu groß für eine 4-SWS-Lehrveranstaltung, d.h., man kann je nach eigenem Ziel und Interesse eigene Schwerpunkte setzen.

■ 1.2 Kompetenzen

Der Ausgangspunkt des Buches ist eine Vorlesung mit dem etwas unbestimmten Titel „Umwelttechnik“, die der Autor seit fünf Jahren regelmäßig als Pflichtveranstaltung im Bachelorstudiengang zum Wirtschaftsingenieur hält. Aus dem oben formulierten Problembereich und der Lehre für eine breit aufgestellte Ausbildung heraus haben sich die Grundlagen dieses Buches entwickelt. Dieses Buch will aktuelle und für die berufliche und private Lebenswirklichkeit relevante Themen und Entwicklungen im Umweltkontext darstellen. Dabei sollen Inhalte und Kompetenzen, die bereits Gegenstand einer üblichen Ingenieurausbildung sind, hier nur im notwendigen Umfang dargestellt werden. Aus der Entwicklung der Veranstaltung und der vielen Diskussionen über Disziplinen hinaus hat sich der Energie-Klima-Ressourcen-Nexus als hochaktuelles, alle Bereiche der technischen Arbeit und des Lebens durchdringendes Themenfeld herausgestellt, das aber gerade im Bachelorstudium nicht den notwendigen Raum bekommt, da dieses Themenfeld in den meisten Ingenieurstudiengängen nicht in das klassische Raster passt.

Kennzahlen sind heute in Industrieunternehmen ein wesentliches Element bei der Analyse, Planung und Steuerung. Sie sind essentiell für die Durchführung von Projekten, für die Gestaltung der Zukunft des Unternehmens und für die tägliche und

langfristige Führung. Gute Kennzahlen haben aus einer technischen Perspektive heraus eine hohe Aussagekraft und ermöglichen das geordnete Bewerten und bewusste Auswählen von Lösungen. Aus diesem Grund nimmt der Umgang mit Kennzahlen einen wichtigen Platz ein.

Parallel hat eine interdisziplinäre öffentliche Ringvorlesung, die der Autor seit vier Jahren mitgestaltet, einen Einfluss genommen: Dort wurden viele Fäden der öffentlichen Wahrnehmung aufgegriffen und aus unterschiedlichen Sichtweisen dargestellt und analysiert. Dabei zeigte sich immer wieder, dass es notwendig ist, bei allen Themen nachhaltiger Entwicklung einen systemischen Ansatz zu verfolgen. Gleichzeitig ist es wesentlich, den Einfluss des Energie-Klima-Ressourcen-Nexus nicht aus den Augen zu verlieren und über zumindest grundlegende Kompetenzen in der Analyse und Bewertung energetischer Aufwände zu verfügen. Viele sinnvolle technische oder wissenschaftliche Aussagen zum Ressourceneinsatz, zur Bereitstellung von Elektrizität und mechanischer Arbeit sowie zu Systemwirkungen sind nur auf der Basis der Lehre von der Energie möglich, also der Thermodynamik. Evidenzbasierte Entscheidungsprozesse – also Entscheidungen, bei denen Sachargumente zählen – benötigen belastbare technische Fakten und Methoden. Ingenieurinnen und Ingenieure haben dabei die Rolle, Diskussionen technischer Probleme auf das zurückzuführen, was tatsächlich technisch machbar ist. Dafür benötigen sie selber ein Grundgerüst an Fähigkeiten und Wissen; dies zu vermitteln ist ein weiteres Ziel. Für die hier dargestellten Methoden und Beispiele benötigt man als Rüstzeug die Konzepte, Definitionen und Formeln aus einer Grundvorlesung Thermodynamik, denn die Anwendung grundlegender Kenntnisse und Methoden der Thermodynamik bei der Diskussion von energiebezogenen Themen ist ein Zeichen von Ernsthaftigkeit des Denkens und Bemühens.

Das Ziel guter Lehre ist, den Studentinnen und Studenten reale anwendbare Kompetenzen zu vermitteln, wobei diese Kompetenzen nur eingesetzt werden können, wenn neben ihnen eine Basis an nutzbarem Wissen um Zusammenhänge bereitsteht. Diese Kompetenzen müssen wir Lernenden uns in unserem ganz individuellen Lernprozess selber aneignen. Die mit diesem Buch verbundene Hoffnung ist, dass reale, aktuelle Beispiele hoher technischer und gesellschaftlicher Relevanz für das eigene weitere Leben eine zusätzliche Motivation bieten, die durch den nicht immer einfachen Stoff trägt. Auch dies erklärt die Inhalte und Struktur der explizit durchgerechneten Beispiele.

Konkret sollen die folgenden Kompetenzen (Biggs 2011) vermittelt werden:

1. Die grundlegenden Methoden aus einer Grundvorlesung Thermodynamik, wie sie in allen Ingenieurwissenschaften gelehrt wird, sollen hier weiter angewendet und damit vertieft werden. Dadurch soll Mut gemacht werden, die systemische Sichtweise, die so zentral für die thermodynamische Methode ist, auf eine Vielzahl von Problemen anzuwenden. In vielen Fächern ist es im Studium nicht einfach zu vermitteln, warum gerade dieser Stoff mit diesen Inhalten so gelehrt

wird; dieses Buch soll für die Thermodynamik hierzu eine Antwort mit einer sehr weiten Perspektive geben.

2. Die Fähigkeit, sich in nicht gut bestimmten Problemen oder unklaren Situationen Orientierung zu verschaffen, ist für den Umgang mit technischen, persönlichen oder gesellschaftlichen Problemen sehr hilfreich und soll hier geübt werden. Dies erklärt die Inhalte und die Form der Beispiele. Auch im Berufsleben begegnen einem oft unübersichtliche Situationen oder schlecht definierte Probleme. Dann ist es notwendig, zuerst einmal überschlägig Zahlen abzuschätzen, um das Problem selber und die Aufgabenstellung besser einzugrenzen. Diese Situation weicht stark vom Studium ab, in dem meist nur klar und vollständig vorgegebene Aufgaben zu lösen sind, d. h., es wird im Berufsleben eine Kompetenz benötigt, die im Studium kaum erfahrbar gemacht wurde. Die hier dargestellten Methoden und Diskussionen sind für erste Abschätzungen geeignet, sie sind ideal, um ein Problem einzukreisen, Lösungsvarianten zu vergleichen und so die Grundlage für gute Kommunikation zu legen.
3. Viele der dargestellten Methoden und Herangehensweisen sind kennzahlenbasiert. Anhand der dargestellten Methoden lässt sich erkennen, wie Kennzahlen konstruiert werden, welche Anforderungen an gute und relevante Kennzahlen gestellt werden und welche Fragen gestellt werden müssen, wenn man selber beurteilen muss, ob eine Kennzahl eine relevante Aussage trägt. Dies sind zentrale Kompetenzen im beruflichen und politischen Umfeld. Ein Ziel ist es daher, selber Einfluss auf die Gestaltung von Kennzahlen nehmen zu können und ggf. unsachliche, ungenaue oder schlecht definierte Kennzahlen auf ein für das Problem angemessenes Niveau zu heben.
4. Im Kapitel 2 wird die wissenschaftliche Methode kurz vorgestellt und es werden Fallstricke bei der Recherche diskutiert. Die Literaturhinweise in diesem Buch sind soweit möglich sehr aktuell gehalten und reichen von Lehrbüchern bis hinein in die aktuelle wissenschaftliche Spezialliteratur. Es wurde die Literatur bewusst übergreifend über Disziplinen mit einbezogen. Dies soll die entsprechenden Kompetenzen als Beispiel aufzeigen und Mut machen, selber alle Formen der Literatur einzubeziehen. Gleichzeitig soll so der Einstieg in eigene Vertiefung oder eine Projektarbeit erleichtert werden.
5. Die Beispiele und die darin berechneten Zahlen sind bewusst groß gewählt. So soll der Umgang mit großen und globalen Problemen vermittelt werden. Die ermittelten Zahlen sind oft kaum vorstellbar und es stellt eine eigene Herausforderung dar, sich diese großen Zahlen immer wieder auf eine greifbare Basis zu stellen. Teil der Kompetenz ist es, auch die Genauigkeit der Ergebnisse abschätzen zu können. Viele der hier ermittelten Ergebnisse und Werte sind nicht sehr genau, jedoch immer ausreichend belastbar, um damit zu weiteren Bewertungen und Schlüssen zu gelangen. Die Fähigkeit, mit nicht absolut richtigen, aber ausreichend genauen Werten zu arbeiten und zu argumentieren, stellt eine der grundlegenden Kompetenzen für Ingenieure dar.

6. Der Umgang mit bewusst globalen Problemen soll zugleich helfen, ein übliches Hemmnis in der Diskussion um Lösungen für große Probleme zu überwinden: Gerne werden in der öffentlichen Diskussion kleinste Lösungen im Detail gefeiert, die bei systemischer Betrachtung aufgrund ihrer im Vergleich zum globalen Problem winzigen Änderungen keinen Beitrag liefern. Dies zu erkennen ist eine eigene Kompetenz.
7. Die diskutierten Probleme sind zumindest von regionaler Relevanz, oft global. Ziel ist es, hier zu vermitteln, dass viele der behandelten Probleme nicht als kleine unabhängige Aufgaben angesehen werden können, sondern globale Problemgebilde sind, in denen es Rückwirkungen und Wechselwirkungen gibt, die alles unübersichtlich und kompliziert machen. Probleme als global und miteinander verbunden zu erkennen, ist eine wesentliche Kompetenz, wenn es um die Gestaltung der Zukunft geht.
8. Unabhängig davon wurden an vielen Stellen relevante Querbezüge zu anderen Themen und Aspekten eingefügt. Wesentlich sind dabei auf der technisch/naturwissenschaftlichen Seite die nichtlinearen Rückwirkungen, durch die viele globale Probleme so schwer zu fassen und zu bearbeiten sind. Die Verbindung mit gesellschaftlichen Aspekten ist von grundlegender Bedeutung für die Ingenieurausbildung. Gute Ingenieurinnen und Ingenieure verfügen über eine klare Haltung und Ethik. Dies zu entwickeln und zu ermöglichen kann nur gelingen, wenn die Verbindung zwischen der technischen und der gesellschaftlichen Sphäre regelmäßig und anschaulich dargestellt wird.
9. Das Bild der lebendigen Welt bzw. des Systems Erde ist aus einer technisch/naturwissenschaftlichen Sicht entwickelt. Damit soll direkt die Anwendbarkeit der Thermodynamik auf natürliche und lebendige Systeme dargestellt werden. Ein grundlegendes Verständnis der wesentlichen Prozesse und Abläufe im System Erde ist die Basis für die weitere Analyse der Umweltauswirkungen menschlichen Handelns. Erst aus dem Verständnis des Systems Erde heraus gelingt es, viele besondere Aspekte des Energie-Klima-Ressourcen-Nexus weiter zu verstehen.
10. Reale und große Probleme sind nie einfache Aufgaben, sie sind boshafte Probleme, die sich einem einfachen Zugang entziehen. Es ist ein wesentlicher Erkenntnisschritt, ein boshaftes Problem als solches anzuerkennen, statt kopflos an einfache Lösungen zu glauben.
11. Sehr viele Probleme können mit relativ einfachen Werkzeugen angegangen werden. Oft genügen überschlägige Berechnungen und einfache Modelle in Kombination mit gründlichem Nachdenken und Zulassen unangenehmer Möglichkeiten, um die wichtigen Erkenntnisse zu bekommen. Diese Vorgehensweise ist eine eigene Kompetenz.

■ 1.3 Kernthesen

Dieses Buch will kein theoretisches Wissen vermitteln, sondern Kompetenzen, die zum Handeln in der Welt führen (Biggs 2011). Dies ist die Bildungsaufgabe der Hochschulen für angewandte Wissenschaften. Dabei wird die Aufgabe, die sich hinter diesem Buch verbirgt, bewusst erst im Kapitel 7 im Detail beschrieben: Wie ermöglichen wir im System Erde langfristig ein gutes Leben und menschliche Zivilisation, wie können wir die natürlichen Grenzen im System Erde einhalten und dafür sorgen, dass wir in einem für uns guten Bereich dieser Randbedingungen leben und handeln? Die Probleme sind:

1. Wie stellen wir langfristig die ausreichende Versorgung unserer Gesellschaft mit notwendiger Energie sicher, ohne das System Erde für uns übermäßig nachteilig zu beeinflussen?
2. Wie stellen wir kurzfristig sicher, dass das stabile Klimaregime der letzten 10 000 Jahre nicht in einer Form kollabiert, die für uns und unsere Gesellschaft große oder existenzgefährdende Nachteile nach sich zieht?
3. Welche Ressourcen stehen für die Zukunft und für die Entwicklung unserer Gesellschaft und unseres Lebens zur Verfügung?

Die Kernthesen dieses Buches sind:

- Die Zeit drängt, wenn wir noch selber proaktiv unsere Zukunft gestalten wollen.
- Jetzt abzuwarten, um dann in der nahen Zukunft den sehr dynamischen Entwicklungen im System Erde hinterherlaufen zu müssen, ohne noch selber gestalten zu können, ist eine ausgesprochen unattraktive Idee.
- Wir wissen längst genug, um sofort zum notwendigen Handeln kommen zu können. Viele aktuelle Literaturhinweise sollen den direkten Zugang zu diesem Wissen ermöglichen.
- Die drängenden Probleme sind schlecht definiert, es sind sehr boshafte Probleme (Kapitel 2). Dies müssen wir verstehen und wir müssen akzeptieren, dass es keine einfachen Lösungen gibt, sondern nur Alternativen schlechter Möglichkeiten.
- Lösungen für diese boshafte Probleme sind nie nur technisch oder nur gesellschaftlich, sie entstehen aus einer Verbindung beider Herangehensweisen.
- Viele Probleme können mit einfachen Mitteln, wie Taschenrechner oder Tabellenkalkulation in ausreichender Genauigkeit beschrieben werden, um zu relevanten Aussagen zu kommen. Wesentlich für das Handeln sind der menschliche Umgang und das Übernehmen von Verantwortung, dies können wir nicht an unsere Maschinen delegieren.

■ 1.4 Aufbau

Teil I Grundlagen, Methoden, Kennzahlen, Rahmenbedingungen

Der erste Teil bietet viele Grundlagen, die zusammen eine Basis erzeugen, mit der technische Fragestellungen einer Energiewende genauso bearbeitet werden können wie die Interaktion zwischen technischen und gesellschaftlichen Aspekten. Der wesentliche Baustein für die Problembearbeitung sind dabei energetische Kennzahlen, die Interaktion zwischen Energie, Ressourcen und Wachstum sowie die Wechselwirkungen zwischen Energie- und Ressourcenbedarf, nachhaltiger Entwicklung im System Erde und der Erderwärmung.

Kapitel 2 – Probleme, Entscheiden, Quellen

Dieses Kapitel dient der Vorbereitung für alles Weitere, es vermittelt wesentliche, ganz allgemeine Grundlagen für den konstruktiven, evidenzbasierten und lösungsorientierten Umgang mit Problemen. Dafür wird eine etablierte Einteilung für Probleme vorgestellt, diese macht deutlich, dass dieses Buch auf boshafte Probleme fokussiert, die sich einer einfachen, rein technischen Lösung entziehen. Dazu werden Grundlagen wissenschaftlichen Arbeitens zusammengefasst.

Kapitel 3 – Thermodynamische Grundlagen

Hier sind kurz die wesentlichen, für die Beispiele und nachfolgenden Kapitel notwendigen Inhalte der Thermodynamik zusammengefasst. Alle relevanten Definitionen und im Weiteren als bekannt vorausgesetzten Grundlagen der Thermodynamik werden hier dargestellt. Damit kann es auch als Formelsammlung für die Übungsaufgaben eingesetzt werden.

Kapitel 4 – Produktlebensweg und Ressourcen

Grundlegend für die energetischen Kennzahlen ist es, den vollständigen Lebensweg eines Produktes und die für den Lebensweg notwendigen Ressourcen zu überblicken. Die hier vorgestellten Konzepte zu Angaben über die Reichweite oder Menge von Ressourcen sind genauso notwendige Grundlage einer Analyse einer zukünftig vielleicht nutzbaren Technologie wie auch der aktuelle Stand ihrer Entwicklung als Technology Readiness Level. Als Abschluss wird die Methode einer evidenzbasierten Risikobetrachtung vorgestellt, mit der die Auswirkung von Unsicherheiten auf Ziele analysiert werden kann.

Kapitel 5 – Wachstum

Wachstum ist eines der zentralen Themen bei einer Umstellung eines Energiesystems. Dieser Abschnitt fasst alle wichtigen Formeln zusammen, mit denen eine wachsende oder schrumpfende Größe und ihr Verhalten über die Zeit beschrieben

werden kann. Dazu werden Aspekte von Wachstum für eine Reihe von Ressourcen intensiver betrachtet.

Kapitel 6 – Energetische Kennzahlen

Dieses Kapitel stellt die fundamentalen Kennzahlen dar, mit denen Kraftwerke, Energieträger und allgemein Energieinfrastruktur im Weiteren bewertet werden können. Diese umfassen Wirkungsgrad und Nutzungsgrad von Kraftwerken, den kumulierten Energieaufwand (KEA) und als wichtigste Kennzahl den energetischen Ertrag als EROI. Daten und Material zum Verständnis dieser Größen sind enthalten sowie auch eine Einführung in das Thema der Qualität von Energie und in die klassische technische Abwägung zwischen Leistung und Wirkungsgrad eines Kraftwerks oder Motors.

Kapitel 7 – Was ist das Problem?

Nachdem die wichtigen Grundlagen und Kennzahlen vorgestellt sind, erfolgt hier eine Diskussion des Problems der Energiewende selber. Da die Energiewende selber ein superboshafes Problem ist, kann dieses Kapitel kein fertiges Lastenheft enthalten, es gibt aber notwendige Kriterien für ein gutes Lastenheft. Dafür enthält es neben der Definition von superboshafem Problemen eine Einordnung der technischen Anforderungen an die zukünftige Bereitstellung von Energie in die drei eng verbundenen Problemkreise der Energiewende, der industriellen Erderwärmung und der Ziele einer nachhaltigen Entwicklung.

Kapitel 8 – System Erde

Die Probleme aus Kapitel 7 sollen im System Erde gelöst werden. Daher stellt dieser Abschnitt wesentliche Randbedingungen des Systems Erde vor, die von besonderer Bedeutung für eine fortgesetzte und längerfristige menschliche Nutzung sind. Dieser Abschnitt folgt dabei dem Strom der Energie durch das System Erde. Menschliche Aktivitäten werden erst spät als Teil der lebendigen Welt eingeführt.

Teil II Energiewende gestalten

Der zweite Teil verbindet die Methoden und Rahmenbedingungen aus dem ersten Teil jeweils mit konkreten technischen Möglichkeiten. Hierbei ist der Fokus gerade nicht, die einzelnen Techniken im Detail vorzustellen – dafür gibt es viel besser geeignete Lehrbücher (Quaschnig 2019). Stattdessen stehen im Zentrum der Betrachtung immer das grundlegende Potential der Technik, physikalische und andere Grenzen für ihre Nutzung, die Interaktion mit dem System Erde, relevante gesellschaftliche Aspekte sowie weitere technische Rahmenbedingungen für eine Nutzung. Die Betrachtungsebene ist eher global oder zumindest regional und nicht spezifisch für einen bestimmten Standort.

Kapitel 9 – Wärme

Dieses Kapitel ist in einem gewissen Sinne das Benchmark für alles Weitere. Hier werden wichtige Aspekte fossiler Primärenergieträger und ihre Verwendung für die Bereitstellung von Arbeit oder Elektrizität dargestellt. Da sich die meisten regenerativ erzeugten Brennstoffe ähnlich verhalten oder verhalten sollen wie fossile Energieträger, sind diese hier gleich mit einbezogen. Als weitere relevante Technik wird Solarthermie betrachtet.

Kapitel 10 – Leistung

Die Umwandlung oder Entnahme von Leistung aus Massenströmen im System Erde ist der Gegenstand dieses Kapitels. Schwerpunkt ist, welche Ströme im System Erde in welchem Maße bereitstehen und bis zu welchem Maße sie genutzt werden können. Der Schwerpunkt liegt auf den heute relevanten, also Wind und Wasserkraft.

Kapitel 11 – Elektrizität

Dieser Abschnitt fokussiert auf die Photovoltaik: Welcher Anteil solarer Strahlung kann genutzt werden, welche Voraussetzungen und Randbedingungen liegen vor?

Kapitel 12 – Elektrizität speichern

Das Speichern von Energie ist einer der wichtigen zusätzlichen Technologie-Bausteine einer Energiewende. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über technische Möglichkeiten und ihre energetischen Rahmenbedingungen und Kosten.

Kapitel 13 – Abgase, insbesondere Kohlendioxid

Ausgehend von den klassischen Schadstoffen Staub, Schwefel und Stickoxiden werden zuerst heutige technische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen für die Abgasbehandlung grob abgesteckt. Das Ziel ist es, den energetischen Aufwand für angewendete Reinigungsmethoden und ihre Auswirkungen auf die Energiebereitstellung zu kennen. Ausgehend von dieser Grundlage werden dann Möglichkeiten einer Behandlung von Kohlendioxid als Abgas betrachtet. Hierbei gibt es heute zwei diskutierte Wege, einmal die Abscheidung und geologische Lagerung des Kohlendioxids, so dass es langfristig keine Auswirkung in der Atmosphäre zeigt, und zum zweiten die Möglichkeit des Geoengineerings, also der technische Eingriff in die Energiebilanz der Erde.

Kapitel 14 – Ausblick und Möglichkeitsräume

Das letzte Kapitel blickt auf die Frage, wie schnell eine Energiewende gestaltet werden kann und was es braucht, um eine Energiewende umzusetzen.

Die Kapitel 2, 7 und 14 überschreiten dabei bewusst den ingenieurwissenschaftlichen Rahmen und diskutieren gesellschaftliche Aspekte. Ingenieurinnen und Ingenieure müssen die Umweltauswirkungen ihrer Technik verstehen und berücksichtigen, sie müssen dazu auch mit anderen Disziplinen zusammenarbeiten und versuchen, außerhalb ihres eigenen disziplinären Bereiches zu kommunizieren. Außerdem erfordern boshafte Probleme die Einbeziehung aller Aspekte.

Beispiele

Die Beispiele illustrieren die Anwendung von vielen eingeführten Konzepten. Gleichzeitig dienen sie dazu, konkrete Umweltauswirkungen darzustellen. Keine Technologie ist ohne Probleme und konkrete Beispiele sind hier als Ort gewählt, dies zu verdeutlichen.

Dieses Buch deckt einen großen Bereich an Inhalten ab, es ist inspiriert von einigen zumeist englischsprachigen Fachbüchern, hat aber letztendlich durch die methodischen Festlegungen aus Abschnitt 1.2 einen ganz eigenen Schwerpunkt entwickelt. Der größte Teil der beschriebenen Methoden ist so oder so ähnlich an anderem Ort entwickelt und beschrieben, die Originalarbeit oder eine gute Einführung ist immer als Quelle angegeben. Die Beispiele sind selbst entwickelt, sie sind durch die aktuelle Fachliteratur, durch Berichte in der Tagespresse oder durch Diskussionen angeregt. Die Hoffnung des Autors ist, dass die Methoden und Werkzeuge jeweils richtig, vollständig und anwendbar dargestellt sind. Gleiches gilt für den Lösungsweg der Beispiele und die berechneten Zahlenwerte. Da dies eine erste Auflage ist, kann es leider sein, dass es doch Fehler bis hierher geschafft haben.

Die in den Beispielen verwendeten Zahlenwerte sind nach bestem Wissen und Gewissen ermittelt worden, trotzdem sind sie manchmal ungenau, veraltet oder es gibt abweichende Werte aus anderen Quellen; oft sind sie Mittelwerte, die bei einer genaueren Betrachtung oder der Analyse überprüft werden müssen. Die Ergebnisse der Beispiele sind auch daher Schätzungen, allerdings sind sie ausreichend belastungsfähig, um Schlussfolgerungen zu erlauben.

■ 1.5 Dank

Dieses Buch ist das Ergebnis eines langen persönlichen Prozesses. Hier ist eine Vielzahl von Ideen, Anregungen, Diskussionen und Beiträgen aus den unterschiedlichsten Richtungen eingeflossen. So wie dieses Thema kein reines technisches Ingenieurthema sein kann, so sind die aufgenommenen Anregungen weit über den Rahmen ingenieurwissenschaftlichen Denkens hinaus einbezogen. Der erste Dank gilt daher allen, denen ich zuhören durfte: Studenten, Kollegen, Freunden,

Verwandten. Auch und gerade wenn ich nicht ihrer Meinung war, haben sie alle dadurch geholfen, die Argumentationen zu schärfen.

Großer Dank gilt all meinen Studentinnen und Studenten, die mit mir den Gegenstand dieses Buches erlernt und mit ihren vielen Fragen dieses Projekt überhaupt erst möglich gemacht haben. Ihre Fragen, ihre manchmal unerwarteten Wege, ihre Lernprozesse besonders bei Projekt- und Abschlussarbeiten finden sich an sehr vielen Stellen wieder. Besonders danken möchte ich Manuel Kilgenstein, der viele der ursprünglichen Beispiele durchrechnet, sowie Lukas Fischer, der alte und neue Beispiele in der abschließenden Version kontrollierte und einige echte Fehler gefunden hat. Ein ganz besonderer Dank gilt Sandra Jacobs, die das Manuskript aus studentischer Sicht und mit einem sehr wachen Auge für alle Schwächen, Sprünge und Widersprüche gegengelesen hat. Ohne ihre Anmerkungen wären viele Abschnitte viel schwerer verdaulich geblieben!

Meine Arbeit im DKE K191 und im IEC TC 111 bietet mir die Gelegenheit, den Möglichkeitsraum und die Sicht der Industrie zu vielen Fragestellungen direkt zu erfahren. Gleichzeitig erlernt man in der Normung großen Respekt vor der gemeinsamen Arbeit an komplexen Fragen, außerdem mit Bescheidenheit und Selbstbewusstsein Beiträge zu schwierigen Problemen zu formulieren, sowie andere Sichtweisen zu verstehen, zu akzeptieren und dann in die gemeinsame Arbeit zu integrieren. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im DKE K191 und im IEC TC 111 gilt daher mein großer Dank für meine Aufnahme in den Kreis und die Geduld in Diskussionen.

Die interdisziplinäre Initiative Nachhaltige Entwicklung (i:ne) in der Hochschule Darmstadt ist ein Ort, an dem ich Impulse aus nahezu jeder denkbaren Richtung bekommen habe: Die Perspektiven der Mitglieder sind sehr unterschiedlich, dadurch werde ich eigentlich in jeder Diskussion und bei jedem Treffen um neue Ideen und Sichtweisen bereichert. Eine ganz konkrete Möglichkeit des Lernens bietet sich mir mit der Ringvorlesung „*Herausforderung Nachhaltige Entwicklung*“, die immer im Winter die Verbindung zwischen dem Allgemeinen und dem Regionalen, zwischen globalen Anforderungen und konkretem Handeln herstellt. Allen Beteiligten dort gebührt tiefster Dank für ihre Offenheit und Diskussionsfreude. Ein wichtiger Teil der Ringvorlesung sind studentisch produzierte Videos. Im Vorfeld ergeben sich dabei tolle Einblicke in die Lösungsideen und Ansätze, daher danke ich allen Studentinnen und Studenten für diese Beiträge. Besonderer Dank gilt dabei Jörg Altekruise (<https://youth4planet.com/>), der uns allen Mut macht, selber das Medium Film zu nutzen, um gehört zu werden.

Meine tapfere Familie hat jetzt monatelang einen abwesenden Vater und Ehemann ertragen, sie hat eine riesige Wanderdüne an Literatur in ihrem Wohnzimmer und einen vollgepflasterten Esstisch durchgestanden. Aber sie hat mir trotzdem immer Mut gemacht, dieses Projekt anzugehen und abzuschließen – toll!

■ 1.6 Literatur

Biggs, J.; Tang, C.: *Teaching for Quality Learning at University*. McGraw Hill, Maidenhead 2011

Perkins, J.H.: *Changing Energy. The Transition to a Sustainable Future*. University of California Press, Oakland 2017

Quaschnig, V.: *Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Klimaschutz*. Hanser, München 2019

Smil, V.: *Energy and Civilisation. A History*. The MIT Press, Cambridge 2017

2

Probleme und Lösungen

Wie wollen wir die anstehenden gesellschaftlichen und technischen Probleme aus einer allgemeinen umwelttechnischen Sicht lösen? Was genau kennzeichnet diese relevanten Probleme und woran erkennen wir eine gute Lösung? Dieser Abschnitt soll uns erst einmal diese Orientierung verschaffen, bevor dann die nächsten Abschnitte fachlich werden.

Das Ziel ist es, solide, belastbare und für möglichst viele Menschen positive Entscheidungen zu treffen, um die großen zukünftigen Herausforderungen anzugehen und möglichst gut zu steuern. Dafür müssen wir nicht nur Lösungsmöglichkeiten erzeugen, sondern diese im Hinblick auf das Problem selber, ihre möglichen Ergebnisse, Resultate und Folgen hin, analysieren. Dies machen wir allgemein auf der Basis von Fakten, unter der Berücksichtigung geltenden Regularien, Gesetzen, Normen und Regeln und unter Nutzung der wissenschaftlichen Methode. Damit orientieren wir uns zugleich an der Ingenieurethik, wie sie vom VDI im Jahr 2002 entwickelt wurde und mit Bezug auf die Themen dieses Buches in der Tabelle 2.1 zusammengefasst ist. Diese Berufsethik sehen wir hier als Leitstern für unser Handeln als Ingenieur an.

Tabelle 2.1 Ethische Grundsätze des Ingenieurberufs (VDI 2002)

| Aspekt | Handlungen |
|--------------------|--|
| Compliance | Ich kenne die einschlägigen Gesetze und Regularien und halte sie ein. Ich wirke an der Weiterentwicklung von Gesetzen und Regularien mit. |
| Verantwortung | Ich übernehme Verantwortung für mein eigenes Handeln. |
| Lösungsentwicklung | Ich übernehme die technische Verantwortung für Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit, für Dokumentation sowie Informationen zu bestimmungsgemäßer Verwendung und Gefahren. Ich entwickle bei dem Gestalten technischer Produkte und Verfahren Lösungsalternativen und ich eröffne neue Suchräume, wobei ich die Möglichkeiten von Fehlentwicklungen und vorsätzlichem Fehlgebrauch berücksichtige. |