

Sven Linow

Quantitative Bewertung von Energiesystemen

Methoden – Lösungen – Anwendungen



2., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Linow
Quantitative Bewertung von Energiesystemen



Bleiben 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

Quantitative Bewertung von Energiesystemen

Methoden – Lösungen – Anwendungen

2., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Sven Linow, Hochschule Darmstadt



Print-ISBN: 978-3-446-48343-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-48455-9

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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 benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

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

Covergestaltung: Thomas West

Titelmotiv: © Shutterstock / Summit Art Creations

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort	XI
1 Einführung	1
1.1 Kernthesen	1
1.2 Fokus	3
1.3 Kompetenzen	4
1.4 Aufbau	6
1.5 Dank	9
Teil I – Grundlagen	11
2 Probleme und Lösungen	15
2.1 Die wissenschaftliche Methode	18
2.2 Verlässliche Quellen erkennen	20
2.3 Gesellschaftliche Aspekte technischer Veränderungen	27
2.4 Was wissen wir?	28
2.5 Umwelt und Technik	30
2.6 Methodisch Lösungen finden	32
2.7 Entscheidungsräume	35
2.8 Risiko	38
3 Energie-Grundlagen	45
3.1 Systeme	45
3.2 Energie und Zustandsänderungen	48
3.2.1 Energetische Zustandsgrößen	48
3.2.2 Energieerhaltung und Prozessgrößen	50

3.2.3	Wärme	52
3.2.4	Fließprozesse	53
3.3	Entropie und zweiter Hauptsatz	57
3.4	Fluide beschreiben	60
3.5	Energiewandlung	64
3.5.1	Wirkungsgrad	64
3.5.2	Wärme in Arbeit umwandeln	64
3.5.3	Arbeit in Arbeit umwandeln	65
3.5.4	Druckverlust als Dissipation	67
3.5.5	Wärmeübertragung	69
3.6	Optische Strahlung	70
3.7	Wärmeübertragung durch Strahlung	76
4	Infrastruktur und Technik beschreiben	81
4.1	Lebenswegbetrachtung	81
4.2	Ressourcen	93
4.3	Rohstoffe	96
4.4	Herstellung von Produkten	106
4.5	Transport von Gütern	110
4.6	Entwicklungsstand einer Technik.	111
5	Energetische Kennzahlen	117
5.1	Qualität der Energie	117
5.2	Maximale Leistung oder maximale Effizienz?	119
5.3	Einfache Kennzahlen	122
5.3.1	Nennleistung	122
5.3.2	Wirkungsgrad	122
5.3.3	Nutzungsgrad	124
5.4	Energie und Ressourcen	127
5.4.1	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	127
5.4.2	Den KEA ermitteln	130
5.4.3	Abbruchbedingungen bei der Berechnung des KEA	133
5.4.4	KEA menschlicher Tätigkeiten.	134
5.4.5	Material- und Energiefluss-Analyse	138
5.4.6	Bezugsgröße Primärenergie.	139

5.4.7	Net-Energy	140
5.4.8	Energie und Geld.	141
5.5	Energy Returned on Energy Invested (EROI)	142
5.5.1	EROI bestimmen – die Methode	142
5.5.2	EROI für Kraftwerke.	145
5.5.3	Abgeleitete Größen.	147
5.5.4	Interpretation des EROI.	148
5.5.5	Energieklippe.	156
5.6	Energiespeicher	157
5.6.1	Fossile Energiespeicher.	157
5.6.2	Kennzahlen für Speicher	158
5.6.3	Speicher und EROI	161
6	Wachstum.	165
6.1	Konstante Wachstumsrate	166
6.2	Integrale	168
6.3	Näherung für kleine Änderungsraten	169
6.4	Was kann wachsen?	172
6.5	Kosten-Nutzen-Analyse	177
7	Das System Erde	185
7.1	Die Erde als Planet – Energiebilanz	185
7.2	Prozesse in der Atmosphäre.	192
7.3	Wind.	195
7.4	Wasserkreislauf.	197
7.5	Treibhauseffekt der Erde	199
7.6	Kohlendioxid in der Atmosphäre	206
7.7	Der Mensch im System Erde.	212
Teil II – Umsetzen		219
8	Energiewende – die Aufgabe	223
8.1	Zustand und Trajektorien	223
8.1.1	Planetare Grenzen	226
8.1.2	Klimaüberhitzung.	230
8.1.3	Warum die Energiewende jetzt?	239
8.2	Ziele – Anthropozän statt Hell’ozän	242

8.3	Transformation gestalten	247
8.3.1	Paradigmen nachhaltiger Entwicklung	248
8.3.2	Resiliente Systeme	254
8.3.3	Digitalisierung	257
8.4	Optionen bewerten	264
9	Bereitstellen von Wärme	275
9.1	Einsatz von Brennstoffen	278
9.2	Fossile Brennstoffe	285
9.3	Photosynthese und Pflanzenwachstum	290
9.4	Organische Brennstoffe	295
9.5	Kernspaltung	302
9.6	Kernfusion	305
9.7	Solarthermie	307
9.7.1	Kollektor ohne Konzentrator	307
9.7.2	Solarthermie mit Konzentration	309
9.8	Kältemaschine und Wärmepumpe	313
9.9	Geothermie und Erdwärme	317
9.10	Elektrowärme	318
10	Wasserstoff und seine Derivate	321
10.1	Herstellung von Wasserstoff	322
10.1.1	Wasserstoff aus fossilen Energieträgern	323
10.1.2	Wasserstoff aus Elektrizität	325
10.2	Wasserstoff-Derivate	325
10.3	Wasserstoff als Energieträger	328
10.4	E-Fuels	333
10.5	Essenzielle Verwendung	334
10.6	Transport und Lagerung des Wasserstoffs	336
10.7	Treibhausgas	342
11	Strömungen nutzen	345
11.1	Wasserkraft	345
11.1.1	Technische Lösungen	348
11.1.2	Meeresströmungen	354
11.1.3	Gezeitenkraftwerke	355

11.2	Windkraft	359
11.2.1	Nutzbare Energie	359
11.2.2	Windräder optimal aufstellen	362
11.2.3	Eigenschaften von Wind	363
12	Direkte Erzeugung von Elektrizität	371
12.1	Photovoltaik	371
12.2	Wichtige PV-Varianten	375
12.3	EROI der Photovoltaik	379
12.4	Aufstellung von PV-Anlagen	381
12.5	Thermoelektrik	392
13	Energie speichern und transportieren	395
13.1	Energie als Arbeit speichern	396
13.2	Elektrizität direkt speichern	399
13.3	Energie als Wärme speichern	402
13.3.1	Wärmespeicher	402
13.3.2	Druckluftspeicher	407
13.4	Speicher, EROI und Curtailing	408
13.5	Energie transportieren	411
14	Treibhausgase behandeln	417
14.1	Konventionelle Abgasreinigung	417
14.2	Treibhausgase	424
14.3	Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Usage (CCU)	429
14.4	Negative Treibhausgasemissionen	434
14.4.1	Was sind gute/sinnvolle NET-Methoden?	436
14.4.2	Technische Methoden für CCS	439
14.4.3	Technische Eingriffe in biologische Prozesse	440
14.4.4	Technische Eingriffe in geologische Prozesse	443
14.4.5	Bewertung der Ansätze	444
14.5	Geengineering	444
14.6	Ausblick	447
15	Wie geht es weiter?	451
15.1	Energietechnologien	451

15.2	Transformieren ist komplex.....	455
15.2.1	Transformation oder Disruption?.....	457
15.2.2	Geschwindigkeit der Transformation	460
15.2.3	Stofflich-technische Grenzen	462
15.2.4	Nutzbare Energieströme.....	464
15.3	Energie-Szenarien.....	464
15.4	Krisen bewältigen.....	468
15.5	Anfangen.....	472
16	Konstanten, Symbole und SI-Vorsätze	475
17	Anhang: Daten zu den Kernthemen des Buches	483
17.1	Die Elemente	484
17.2	Grundlegende Stoffwerte	488
17.3	Atmosphäre und Treibhausgase	488
17.4	Einheiten der Energie	491
17.5	Brennstoffe.....	492
17.6	Graue Energie	494
17.7	Transport.....	498
17.8	Landverbrauch	499
17.9	Bereitstellung von Energieträgern	500
17.10	Wirkungsgrade	502
17.11	EROI	506
17.12	Reichweite wichtiger Metalle.....	508
17.13	Angemessene Lebensbedingungen.....	510
17.14	Normen für die Energie-Infrastruktur.....	511
Index	515

Vorwort

Wollen wir unsere Zukunft im Rahmen des Möglichen selbst gestalten oder lassen wir sie einfach über uns kommen? Wollen wir für die Gestaltung unserer Zukunft den tatsächlichen Zustand unserer lebendigen Erde – in der unsere Zukunft stattfindet – und die Möglichkeiten, die uns unsere lebendige Erde lässt, als Grundlage verwenden? Welche Möglichkeitsräume für eine aktive Gestaltung haben wir heute? Diese Fragen stehen im Zentrum unserer aktuellen gesellschaftlichen Debatten.

Die diesbezügliche gesellschaftliche Diskussion ist in einem Findungsprozess: Auf der einen Seite dominieren Stimmen, die fest im Vertrauen auf die Magie des technologischen Fortschritts verankert sind. Dieser solle zur gegebenen Zeit aus sich selbst heraus einfach alle Probleme lösen. Dieses Ereignis werde stattfinden, sobald der Fortschritt ganz ohne aktive Unterstützung, Steuerung oder Lenkung durch den Staat oder die Gesellschaft, aber vielleicht durch das Zutun von Marktkräften, 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 für eine gemeinsame Zukunft entwickelt werden. Viele Argumente in diesem Diskurs sind durch den Verzicht auf belegbare sachliche Begründungen und quantitative Beweisführungen geprägt.

Der Glaube an und die Hoffnung auf rein technische Lösungen adressiert heutige und künftige Ingenieur:innen direkt. Wir sind das *Sie* in „Sie werden eine Lösung finden.“ Das Ziel guter Ingenieurausbildung ist es, zur konsequenten Verwendung quantitativer Methoden und sachlicher Begründungen zu befähigen. Kernkompetenzen guter Ingenieur:innen sind der Umgang mit Zahlen, die Quantifizierung von Ursachen und Wirkungen sowie die Befähigung, Entscheidungen auf der Basis von sachlich und quantitativ begründbaren Argumenten zu treffen. Wer von uns möchte schon in ein Flugtaxi steigen, dessen Design ohne Beachtung von (technischen) Regeln ausgeführt wurde und nur auf Vertrauen in den Fortschritt beruht, d. h., auf der Vermutung, es

würde sich gegebenenfalls spontan aus dem Nichts eine Lösung entwickeln, wenn während des Fluges ein Problem auftritt.

An dieser Stelle setzt das vorliegende Buch an. Es führt in den aktuellen Sachstand der Möglichkeitsräume unserer zukünftigen Energieversorgung auf unserer lebendigen Erde ein. Zu diesem Zwecke stellt es quantitative Methoden vor, die es uns erlauben, mit belastbaren Zahlen und belegbaren Fakten zu argumentieren. Dabei ist verstanden, dass der Rahmen, in dem eine zukünftige Technologie machbar ist, durch Naturgesetze, durch das System Erde und die darin verfügbaren Ressourcen sowie durch die planetaren Grenzen, innerhalb derer eine technisch entwickelte und gerechte menschliche Gesellschaft möglich bleibt, beschränkt ist. Technische Entwicklung kann nur in diesem Rahmen gesellschaftlich gestaltet werden.

Ich hoffe, dass wir beginnen, unsere drängenden Probleme mit der notwendigen Ernsthaftigkeit unseres Denkens und der Angemessenheit unseres Handelns anzunehmen. Auf diese Weise können wir unsere Zukunft innerhalb unserer realen Möglichkeiten selbst gestalten. Die Alternative – eine 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, März 2025

Sven Linow

1

Einführung

Die ausreichende Verfügbarkeit von gut nutzbarer Energie ist eine grundlegende Voraussetzung für das Weiterbestehen unserer Gesellschaft. Erst durch Energie werden Herstellung, Transport, Nutzung und Entsorgung unserer gesamten Technik möglich. Erst durch zukünftig verfügbare Energie können wir die sich anhäufenden Auswirkungen unseres bisherigen technischen Handelns in der Welt bändigen.

Gleichzeitig ändern sich die Rahmenbedingungen für unsere Energietechnik. Auch viele andere Entscheidungsräume unserer Gesellschaft und damit die der Technik verschieben sich. Dies ist der Gegenstand des vorliegenden Buches. Ziel des Buches ist es, Ihnen zu helfen, die Situation und ihre Anforderungen zu erkennen, Werkzeuge bereitzustellen sowie Fähigkeiten zu vermitteln, die es Ihnen in Ihrer Rolle als Ingenieur:innen ermöglichen, Ihre Aufträge möglichst klar zu beschreiben, Ihren Handlungs- und Entscheidungsraum zu erkennen und damit möglichst gute und belastbare Entscheidungen zu treffen.

Das Buch richtet sich an Vertreter:innen aller technischer Disziplinen, da jede Disziplin neben der disziplinären Expertise auch grundlegende gemeinsame Kompetenzen benötigt: Ingenieur:innen brauchen ein tiefes fachliches Wissen, gepaart mit einer breiten überfachlichen Basis, auf der sie arbeiten. Daher liefert dieses Buch eine breite und über die Grenzen der Technik reichende Expertise, um in den hier behandelten Themenbereichen handlungs- und entscheidungsfähig zu sein.

1.1 Kernthesen

Die drängenden Fragen sind: Wie ermöglichen wir uns im System Erde langfristig ein gutes Leben und menschliche Zivilisation? Wie können wir die natürlichen Grenzen unserer lebendigen Erde einhalten und dafür sorgen, dass wir in einem für uns guten Bereich dieser Bedingungen leben und handeln?

Mit Blick auf unser Energiesystem lässt sich dies konkreter formulieren:

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. Welche Ressourcen stehen für die Zukunft und für die Entwicklung unserer Gesellschaft und unseres Lebens langfristig zur Verfügung?
3. 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?

Dies sind keine rein technischen Fragen. Darin verwoben sind ethische Fragen und Fragen zur gerechten Verteilung, die weit über technische Erwägungen hinausgehen. Diese müssen wir mitdenken. Die Kernthesen dieses Buches sind:

- Die Zeit drängt, wenn wir selbst proaktiv eine gute und gerechte Zukunft gestalten wollen.
- Die drängenden Probleme sind schlecht definiert. Es sind sehr boshafte Probleme (siehe 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.
- Wir wissen längst genug, um sofort zum notwendigen Handeln kommen zu können. Viele aktuelle Literaturhinweise sollen den direkten Zugang zu diesem Wissen ermöglichen.
- Jetzt abzuwarten, um dann in der nahen Zukunft den sehr dynamischen Entwicklungen im System Erde hinterherlaufen zu müssen, ohne noch selbst gestalten zu können, ist eine ausgesprochen unattraktive Idee.
- Viele Probleme können mit einfachen Mitteln in ausreichender Genauigkeit beschrieben werden, um zu relevanten Aussagen zu kommen. Wesentlich für unsere Entscheidungen und Handlungen sind der menschliche Umgang und das Übernehmen von Verantwortung. Dies können wir nicht an unsere Maschinen delegieren.

Im Fokus steht die Energy Literacy, mit der wir Relevantes denken, beschreiben, planen oder umsetzen können. Energy Literacy meint die Kompetenz, Energie und energetische Fragestellungen in einer systemischen Form, d. h. mit ihren Auswirkungen und in ihren Größenordnungen, erfassen zu können.

1.2 Fokus

Dieses Lehrbuch fokussiert sich auf den Zusammenhang zwischen den als zentral für die Zukunft unserer Gesellschaft angesehenen Faktoren, der zukünftigen Energietechnik selbst, der Ressourcenbereitstellung für diese Energietechnik sowie der stattfindenden Erderhitzung und Biodiversitätsverluste. Die großen Veränderungen dieser Faktoren werden die Anforderungen an und den Möglichkeitsraum für Technik für unsere zukünftige Entwicklung stark beeinflussen:

- Zukünftig werden regenerative Technologien 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. Das hat massive Auswirkungen auf industrielle Nutzungen und Wirtschaft. Für Ingenieur:innen, die diese Technik gestalten oder mit ihr umgehen, ist es daher wichtig, die Änderungen und neuen Anforderungen zu verstehen, um in ihrer Tätigkeit angemessen darauf reagieren zu können.
- Der Aufwand für die Bereitstellung von Rohstoffen steigt an. Viele Rohstoffe stehen nicht in den für die globale technische Umsetzung aller neuen Ideen benötigten Mengen bereit. Einige sind ernsthaft knapp. Gleichzeitig erfordert moderne Technik oft sehr spezielle Materialien aus teilweise seltenen Rohstoffen. Ingenieur:innen benötigen grundlegende Ideen wie sich dies in der Zukunft entwickeln kann, um darauf angemessen reagieren zu können.
- Die sich aktuell schnell beschleunigende Verschiebung des Klimas global und vor Ort verändert den Raum des Möglichen für die technische Gestaltung. Die Begrenzung der Klimaerhitzung und notwendige Klimaanpassung erfordern neue gesellschaftliche und technische Handlungsweisen. Sie beeinflussen die Verfügbarkeit und die Nutzung aller technisch zugänglichen Formen von Energie global und bei Ihnen vor Ort.
- Unsere lebendige Erde benötigt Raum und Ressourcen für ihr Gedeihen und wir sind von ihr und ihrem Gedeihen vollständig abhängig. Hier bestehen Grenzen und Anforderungen für unsere menschliche Aneignung von Ressourcen.

Diese Bereiche sind intensiv miteinander verwoben. Das systemische Verstehen der Abhängigkeiten in der Tiefe sprengt die Möglichkeiten eines klassischen Ingenieurstudiengangs. Gleichzeitig können diese Rahmenbedingungen nicht ausgeblendet werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden Kennzahlen als Mittel verwendet, um Komplexität zu reduzieren. Kennzahlen sind heute in vielen Organisationen ein wesentliches Element bei der Analyse, Planung und Steuerung. Sie sind essenziell für die Durchführung von Projekten, für die Gestaltung der Zukunft der Organisation 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 – wohl wissend, dass Kennzahlen immer eine Vereinfachung darstellen.

1.3 Kompetenzen

Dieses Buch will die Kompetenzen vermitteln, die Sie zum aktiven Handeln in der Welt befähigen und ermutigen (Biggs/Tang 2011). Um diese Kompetenzen sicher anwenden zu können, benötigen wir ein breites Wissen. Dieses Wissen kann nur begrenzt in einem Buch untergebracht werden. Daher finden Sie in diesem Buch viele Verweise aus dem Bereich der Technik heraus in weitere relevante Wissensbereiche. Diese Verweise sind eine Einladung.

Die Anschlussfähigkeit an relevante Kompetenzen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung ist bewusst eingearbeitet (Brundieters et al. 2021). Systemdenken, strategisches Denken und Zukunftsdenken sind essenziell, um die vorangehend genannten Fragen angehen zu können. Gleichzeitig wird hier eine klare Werteorientierung zugrunde gelegt.

Alle wichtigen aktuellen gesellschaftlichen Themen sind eng mit der sicheren Verfügbarkeit von Energie und Ressourcen verwoben. Dies ist nicht immer direkt sichtbar und wird oft ignoriert, sehr zum Schaden der Diskussion. Es ist erforderlich, dass unsere Ideen und Handlungen zur Gestaltung unserer Zukunft auf einem grundlegenden Wissen über Energie und Ressourcen, energetische Aufwände für Handlungen und zukünftige reale Verfügbarkeit gegründet sind (Energy Literacy). Viele sinnvolle technische oder wissenschaftliche Aussagen zum Ressourceneinsatz, zur Bereitstellung von Energie sowie zu Systemwirkungen sind nur auf der Basis eines grundlegenden Verständnisses von Energie möglich. Die Anwendung grundlegender Kenntnisse und Methoden der Thermodynamik bei der Diskussion von energiebezogenen Themen ist ein Zeichen von Ernsthaftigkeit des Denkens und Bemühens.

Evidenzbasierte Entscheidungsprozesse – also Entscheidungen, bei denen Sachargumente zählen – benötigen belastbare technische Fakten und Methoden. Als Ingenieur:innen nehmen wir die Rolle ein, Diskussionen technischer Probleme auf das zurückzuführen, was tatsächlich technisch machbar ist. Dafür benötigen wir ein robustes Grundgerüst an Fähigkeiten und Wissen. Für die hier dargestellten Methoden und Beispiele wird als Rüstzeug ein kleiner Teil der Konzepte, Definitionen und Formeln aus einer Grundvorlesung Thermodynamik benötigt.

Das Ziel guter Lehr-/Lernsituationen ist es, Student:innen real 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 selbst aneignen. Die mit diesem Buch verbundene Hoffnung ist, dass reale, aktuelle Bei-

spiele hoher technischer und gesellschaftlicher Relevanz für das eigene weitere Leben eine zusätzliche Motivation bieten, die Sie durch den nicht immer einfachen Stoff trägt. Konkret sollen die folgenden Kompetenzen vermittelt werden:

1. Die grundlegenden Methoden aus einer Grundvorlesung Thermodynamik werden angewendet. Dies soll Ihnen Mut machen, die systemische Sichtweise, die so zentral für die thermodynamische Methode ist, auf eine Vielzahl von Problemen anzuwenden.
2. Die Fähigkeit, sich in schlecht bestimmten Problemen oder unklaren Situationen Orientierung zu verschaffen, ist sehr hilfreich im Berufsleben. Zudem ist es notwendig, zuerst einmal überschlägig Zahlen abzuschätzen, um das Problem und die Aufgabenstellung besser zu verstehen und einzugrenzen. Diese Situation weicht stark vom Studium ab, in dem meist nur klar und vollständig vorgegebene Aufgaben zu lösen sind. Die hier genutzten Ansätze 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. Dabei steht oft die Konstruktion der Kennzahl im Fokus. Die hier vermittelte Kompetenz ist die Konstruktion von guten und aussagefähigen Kennzahlen sowie die Beurteilung, ob eine Kennzahl eine relevante Aussage trägt. Im besten Falle nehmen Sie selbst Einfluss auf die Gestaltung von Kennzahlen und können unsachliche, ungenaue oder schlecht definierte Kennzahlen auf ein für das Problem angemessenes Niveau heben.
4. Die wissenschaftliche Methode wird kurz vorgestellt und es werden Fallstricke bei eigenen Recherchen diskutiert. Die Literaturhinweise in diesem Buch sind (soweit möglich) aktuell gehalten und nutzen wissenschaftliche Spezialliteratur unterschiedlicher Disziplinen. Dies soll Ihnen Mut machen, alle Formen der Literatur einzubeziehen und gleichzeitig Quellen mit der gebotenen Distanz zu bewerten.
5. Die Beispiele und die darin berechneten Zahlen sind bewusst groß gewählt. Damit üben wir den Umgang mit erst einmal unvorstellbar großen Zahlen. Es stellt eine eigene Herausforderung dar, diese großen Zahlen immer wieder auf eine greifbare Basis zu stellen.
6. 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 Ingenieur:innen dar.
7. Der Umgang mit bewusst globalen Problemen soll 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 systemi-

scher Betrachtung aufgrund ihrer im Vergleich zum globalen Problem winzigen Änderungen keinen Beitrag liefern. Dies zu erkennen ist eine eigene Kompetenz.

8. Die diskutierten Probleme sind mindestens von regionaler und oft von globaler Relevanz. Viele der behandelten Probleme sind keine kleinen unabhängigen Aufgaben, sondern globale Problemgebilde, 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.
9. An vielen Stellen werden relevante Querbezüge zu anderen Themen und Aspekten eingefügt. Damit sollen die nichtlinearen Rückwirkungen, durch die viele globale Probleme so schwer zu fassen und zu bearbeiten sind, gezeigt werden.
10. Die Verbindung von technischen und gesellschaftlichen Aspekten ist von grundlegender Bedeutung für die Ingenieurausbildung. Gute Ingenieur:innen verfügen über eine klare Haltung und Ethik. Diese Gabe zu entwickeln und zu ermöglichen, kann nur gelingen, wenn die Verbindung zwischen der technischen und der gesellschaftlichen Sphäre regelmäßig und anschaulich dargestellt wird.
11. Das Bild der lebendigen Welt bzw. des Systems Erde ist aus einer naturwissenschaftlichen Sicht entwickelt. Damit wird die Anwendbarkeit der Thermodynamik auf natürliche und lebendige Systeme dargestellt. Ein grundlegendes Verständnis der wesentlichen Prozesse und Abläufe im System Erde ist die Basis für die weitere Analyse der Auswirkungen menschlichen Handelns. Erst aus dem Verständnis des Systems Erde heraus gelingt es, viele besondere Aspekte der hier behandelten Probleme zu erfassen.
12. Reale und große Probleme sind nie einfache Aufgaben. Sie sind boshafte Probleme, die sich einem einfachen Zugang entziehen. Es ist ein wesentlicher Erkenntnisschritt, ein boshafte Problem als solches anzuerkennen, statt an einfache Lösungen zu glauben.
13. 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.

1.4 Aufbau

Teil I: Grundlagen, Methoden, Kennzahlen und Rahmenbedingungen

Teil I bietet viele Grundlagen, die zusammen eine Basis erzeugen, mit der technische und gesellschaftliche Fragestellungen der Transformation unseres Energiesystems bearbeitet werden können.

Kapitel 2 ist nicht technisch. Es vermittelt wesentliche Konzepte zum Verständnis großer Probleme wie dem der Transformation unseres Energiesystems. Zu diesem Zwecke wird eine etablierte Einteilung von Problemen eingeführt. Diese macht deutlich, dass sich dieses Buch auf boshafte Probleme fokussiert, die sich einer einfachen, rein technischen Lösung entziehen. Dazu enthält es wesentliche Grundlagen für den konstruktiven, evidenzbasierten und lösungsorientierten Umgang mit Problemen und die Beschaffung von belastbaren Fakten. Wir wollen evidenzbasiert und wissenschaftlich an unser Problem herangehen. Das erfordert einen kritischen Umgang mit Quellen und Informationen.

In Kapitel 3 sind die wesentlichen und für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel notwendigen Inhalte der Thermodynamik in Kurzform zusammengefasst. Das Kapitel kann keinen Thermodynamik-Kurs ersetzen. Alle Inhalte sind in didaktisch zugänglicherer und fachlich tiefer gehender Form in meinem Lehrbuch *Angewandte technische Thermodynamik* dargestellt (Linow 2022). Dort gibt es eine Vielzahl von Beispielen mit einem direkten Bezug zur Transformation unseres Energiesystems.

Kapitel 4 bietet eine Einführung in den Lebensweg von Produkten. Zentrale weitere Konzepte sind die Verfügbarkeit von Ressourcen sowie der Technologiereifegrad von Lösungsideen.

In Kapitel 5 werden zentrale energetische Kennzahlen eingeführt. Kennzahlen erlauben einen ersten guten Vergleich, wenn sie sauber und belastbar ermittelt wurden.

Kapitel 6 fasst Beschreibungen 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 benötigten Ressourcen betrachtet. Das hier erworbene Verständnis soll helfen, die Geschwindigkeit und die Grenzen von Transformationsprozessen beschreiben und bewerten zu können.

In Kapitel 7 werden energetisch grundlegende Zusammenhänge unseres Systems Erde eingeführt. Wir wollen langfristig in diesem System leben und wirtschaften. Daher liegt der Fokus auf dafür relevanten Teilsystemen und ihren Grenzen.

Teil II: die Transformation gestalten

Bei boshafte Problemen ist die Problembeschreibung ein Teil des Lösungsversuchs. Deshalb kann die Problembeschreibung nicht zu Beginn erfolgen, sondern wartet bis hierher.

Kapitel 8 führt harte Rahmenbedingungen ein, innerhalb derer zukünftige Zivilisationen und ihr Energiesystem arbeiten werden. Dazu diskutiert es wichtige Konzepte und ordnet ihre möglichen Beiträge für eine Transformation ein.

Vor diesem Rahmen aus Möglichkeiten und Anforderungen werden dann die relevanten technischen Konzepte für die Energie-Infrastruktur eingeführt:

In Kapitel 9 geht es um die Bereitstellung von Wärme aus fossilen Brennstoffen, Biomasse und weiteren Quellen.

Das Potenzial von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und daraus hergestellten synthetischen Brennstoffen ist Gegenstand von Kapitel 10. Wasserstoff und seine Derivative haben eine besondere Rolle und werden daher bewusst von fossilen Brennstoffen abgegrenzt dargestellt.

Kapitel 11 fokussiert sich auf Wasserkraft und Wind als direkte Wandlung von mechanischer Leistung in Elektrizität sowie auf ihr Potenzial und ihre Anforderungen.

In Kapitel 12 ist der Schwerpunkt Photovoltaik. Dafür werden zuerst weitere Grundlagen zur solaren Einstrahlung eingeführt.

Jedes Energiesystem enthält Speicher. In Kapitel 13 stehen Speichermöglichkeiten für Elektrizität im Fokus. Synthetische Brennstoffe als Speicher sind Gegenstand von Kapitel 10.

Kapitel 14 hat das Vermindern von Schadwirkungen ins System Erde und die damit verbundenen energetischen Kosten zum Thema. Zuerst geht es um Abgasbehandlung, wie sie heute üblich ist. Der zweite Schwerpunkt ist dann der Umgang mit Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen.

Kapitel 15: Ausblick und Möglichkeitsräume

Kapitel 15 beschäftigt sich mit der Frage, wie schnell wir die Transformation unseres Energiesystems gestalten können und was wir dafür brauchen. Kapitel 2, Kapitel 7 und Kapitel 8 überschreiten bewusst den ingenieurwissenschaftlichen Rahmen und führen gesellschaftliche Aspekte ein, die essenziell für das Problem sind. In Kapitel 15 nehmen wir einige dieser Fäden und auch einige technische Fäden wieder auf und führen sie zusammen.

Kapitel 16 (Formelverzeichnis) und Kapitel 17 (Anhang)

Kapitel 16 enthält ein Verzeichnis der im Buch verwendeten Konstanten, Symbole und SI-Vorsätze. Kapitel 17 (Anhang) enthält viele nützliche Daten – nützlich für die gerechneten Beispiele, aber auch für die eigene Arbeit und für eigene Analysen.

Beispiele

Die Beispiele illustrieren die Anwendung von vielen eingeführten Konzepten. Gleichzeitig dienen sie dazu, konkrete Umweltauswirkungen darzustellen. Keine Technologie funktioniert ohne Probleme. Konkrete Beispiele sind als Ort gewählt, dies zu verdeutlichen. 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 bei der Analyse überprüft werden müssen. Die Ergebnisse der Beispiele sind daher auch Schätzungen, allerdings sind sie ausreichend belastungsfähig, um Schlussfolgerungen zu erlauben.

1.5 Dank

Schon die erste Auflage dieses Buches war das Ergebnis eines langen persönlichen Prozesses. Seitdem ist viel passiert in unserer Welt, sodass eine Neuauflage mit einer gründlichen Überarbeitung aller Inhalte sinnvoll wurde. Ich bin sehr dankbar, dass der Hanser Verlag diesen Weg eröffnet hat und freue mich über die großartige Unterstützung, insbesondere durch Julia Stepp und Tim Borck.

Viele der Themen, die im Buch adressiert werden, sind seitdem deutlich klarer und schärfer zu Tage getreten. Gleichzeitig durfte ich zahlreiche Themen mit unterschiedlichsten Menschen diskutieren. Ich bin sehr dankbar für die vielen Möglichkeiten sowie für die Geduld und die Ideen aller Beteiligten. An der Hochschule Darmstadt sind dies unter vielen anderen Anna Schilling, Carsten Barth-Schulmeyer, Sonja Kleinod, Ulrich Klüh, Martina Mohrbacher, Alexander Landfester, Iris Steinberg, Tom Phillips, Martin Führ, Silke Kleihauer, Anja Hentschel, Nicole Saenger, Jens Hoffmann und Leon Pezzica. In Darmstadt sind es unter vielen anderen unser Klimaamt, Patrick Voos, Oliver Ottinger, Oliver Kah, sowie sehr viele Menschen aus der Zivilgesellschaft wie Sigita Urdse und Heike Böhler. In Hessen sind es die Klimareferate im Landwirtschaftsministerium, meine Kontakte zum HLNUG, zur LEA, zu Menschen aus Initiativen, Vereinen, Parteien und weiteren Kommunen wie z. B. Dietzenbach sowie meinen Mitstreiter:innen im wissenschaftlichen Klimabeirat des Landes Hessen.

Wichtige Impulse kamen aus dem Lehreⁿ-Jahresprogramm 2020, dem StIL-Jahresprogramm 2022 und den Lehreⁿ-Tagungen. Großer Dank gilt allen Organisator:innen und Teilnehmer:innen dieser für mich sehr wichtigen Möglichkeitsräume.

Hinzu kommen wichtige fachliche Diskussionen im Rahmen der For-Future-Organisationen hier in Hessen und auf Bundesebene. Spezieller Dank gebührt meinen Mitautor:innen für unsere Projekte und den Autor:innen der S4F-Impulse zur Kernenergie, die ich mit herausgeben durfte, sowie Jens Clausen und den Mitautor:innen der Policy Paper zur kommunalen Wärmewende.

Ein besonderer Dank gilt all meinen Student:innen, 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 Diskussionen und Lernprozesse finden sich an sehr vielen Stellen wieder. Hinzu kommt eine Vielzahl von studentischen Abschlussarbeiten, die ich begleiten durfte. Die damit verbundenen Diskussionen haben mir neue Erkenntnisse und Ideen geliefert, von denen sich einige im Buch wiederfinden.

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

Literatur

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

Brundiers, K./Barth, M./Cebrián, G./Cohen, M./Diaz, L./Doucette-Remington, S./Dripps, W./Habron, G./Harré, N./Jarchow, M./Losch, K./Michel, J./Mochizuki, Y./Rieckmann, M./Parnell, R./Walker, P./Zint, M.: Key competencies in sustainability in higher education—toward an agreed-upon reference framework. In: Sustainability Science 16, 2021, pp. 13–29

Linow, S.: Angewandte technische Thermodynamik. Carl Hanser Verlag, München 2022

Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Klimaschutz. 11. Auflage. Carl Hanser Verlag, München 2021

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

Teil I - Grundlagen

Wie wollen wir als Gesellschaft die drängenden sozialen und technischen Probleme angehen, die mit der Transformation unserer Energiesysteme verbunden sind? Teil I liefert Ihnen die benötigten Grundlagen, um tiefer über dieses System nachdenken zu können. Die Komplexität unseres historisch gewachsenen Energiesystems durchdringt große Teile unserer Gesellschaft und unseres Planeten. In Teil I nähern wir uns der Beschreibung des Systems an, wobei jedes Kapitel eine eigene Perspektive eröffnet. Das Energiesystem ist einem stetigen Wandel unterworfen, aber um es zukunftsfest zu gestalten, werden wir diesen Wandel stark beschleunigen und uns an die Möglichkeiten des Lebens auf diesem Planeten anpassen müssen. Dies ist Gegenstand von Teil II.

Ziel dieses Buches ist es, wichtige Werkzeuge vorzustellen, mit denen Energietechnik bewertet werden kann, und ihre Anwendung zu illustrieren. Dafür sollen insbesondere Methoden bereitgestellt werden, die aus einer thermodynamischen Perspektive heraus abschätzen, in welchem Maße eine Energietechnik wichtige Ziele erreicht und welche Umweltauswirkungen sie dabei erzeugt. Hierzu wird durchgängig eine systemische Betrachtung benötigt. Diese systemische Betrachtung entsteht durch klar gewählte Systemgrenzen und Methoden, die den Lebensweg eines Produkts möglichst vollständig beschreiben. Dabei wirkt bereits die Zieldefinition aus Kapitel 8 zurück, d. h., es geht schon hier vorrangig um solche Grundlagen, die uns später auf dem Weg zu den noch zu erarbeitenden Zielen helfen.

Kapitel 2 untersucht, was genau diese relevanten sehr schwierigen Probleme kennzeichnet. Es bietet Hilfestellung bei der Frage, wie wir es schaffen, belastbare Fakten zu ermitteln, und es beschäftigt sich mit der Frage, wie wir gute Lösungen erzeugen können. Damit haben wir auch eine Möglichkeit, existierende Lösungswege zu hinterfragen und herauszufinden, wie gut sie sind.

Kapitel 3 liefert eine kurze Einführung in die Thermodynamik. Hier werden wichtige Begriffe der folgenden Kapitel definiert und grundlegende Zusammenhänge eingeführt. Das Kapitel kann keine echte Einführung in die Thermodynamik ersetzen. Es ist eher als Auffrischung oder Einladung zu verstehen, sich dieser Methode und Beschreibung intensiver zu widmen.

Kapitel 4 steigt tiefer in die systemische Betrachtung ein. Dabei steht der Lebensweg von Energie und von Komponenten des Energiesystems im Fokus. Grundlage von Technik ist die Verfügbarkeit von Ressourcen. Der Begriff wird daher einmal ganz allgemein eingeführt und dann speziell mit Blick auf Metalle und ihre zukünftige Versorgung vertieft. Mit Blick auf technologische Entwicklungen und die Frage, wann neue Technologien heutige Probleme lösen können, wird der Technologiereifegrad als Perspektive eingeführt.

In Kapitel 5 werden die Grundlagen zu Energie und Lebensweg zusammengeführt, um wichtige Kennzahlen für Energiesysteme einzuführen. Diese Kennzahlen sind ausgesprochen hilfreich für die Beschreibung und für den Vergleich von unterschiedlichen technischen Möglichkeiten.

Transformation und Veränderung beinhalten immer Wachstum und Schrumpfung. Kapitel 6 stellt Werkzeuge bereit, mit denen wir dies beschreiben können. Dabei kommen wir an der Frage, ob langfristiges Wachstum planetar möglich ist, nicht vorbei.

Kapitel 7 bietet einen Einstieg in die Beschreibung und Größenordnung der Energieströme im System Erde und in den inzwischen relevanten menschlichen Einfluss auf diese. Dabei geht es uns darum, Prozesse zu verstehen und Größenordnungen abschätzen zu können. Auch dies ist eine Einladung, sich tiefer mit diesen Themen auseinanderzusetzen.

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 selbst, d. h. auf die möglichen Ergebnisse, Resultate und Folgen hin, analysieren. Dies machen wir allgemein auf der Basis von Fakten, unter der Berücksichtigung geltender Regularien, Gesetze, Normen und Regeln und unter Nutzung der wissenschaftlichen Methode. Damit orientieren wir uns zugleich an der Ingenieurethik, wie sie vom VDI zuletzt im Jahr 2021 formuliert wurde. Mit diesem Aspekt starten wir.

2

Probleme und Lösungen

Gegenstand dieses Buches sind große Herausforderungen, die erst einmal technisch erscheinen. Sie sind große Herausforderungen, weil ihre Lösung bei genauerer Betrachtung sehr schwierig wird, weil Technik für eine Lösung nicht genügt, weil Technik vielleicht Teil des Problems ist, weil es oft überhaupt keine gute Lösung gibt. Solche Herausforderungen sind schwierig zu erfassen und noch schwieriger zu lösen.

Probleme können in zahme Probleme und in boshafte Probleme unterteilt werden. Im Englischen werden *tame problem* und *wicked problem* als feststehende Begriffe verwendet (Rittel/Webber 1973). Sie wurden hier übersetzt.

- *tame*: Der Begriff *zahn* soll ganz bewusst zu Assoziationen wie freundlich, offensichtlich, kuschelig oder nett führen und nahelegen, dass diese Sorte von Problemen sich menschlicher Gestaltung vollständig untergeordnet hat.
- *wicked*: Auf der anderen Seite illustriert *boshaft* den Charakter von solchen Problemen, die sich auf hinterhältige, unangenehme und nicht vorhersehbare Weise jeder menschlichen Unterordnung entziehen und ihre Wirkung unerwartet, anders als geplant und mit Macht entfalten, unabhängig davon, ob wir sie ignorieren oder verleugnen.

In der VDI 2221-1 werden die Begriffe „Aufgabe“ und „Problem“ verwendet: Zahme Probleme oder Aufgaben im Sinne der VDI 2221-1 sind durch die Aufgabenstellung vollständig beschrieben, es existiert eine Lösung und es gibt eindeutige Kriterien dafür, ob ein Lösungsvorschlag richtig oder falsch ist. Dies ist die Sorte von Arbeitsauftrag, mit dem wir im Studium vorrangig konfrontiert werden, denen Ingenieur:innen im Berufsalltag jedoch eher selten begegnen. Die VDI 2221-1 versteht hier als Problem solche technischen Herausforderungen oder spezifischen Konstruktionsaufgaben, für die es keine einfache Lösung gibt. Bereits diese Probleme benötigen eine eigene systematische Herangehensweise, sie sind jedoch oft keine boshaften Probleme im Sinne der hier verwendeten Definition.

Boshafte Probleme

Die hier im Fokus stehenden Problemkreise Energieversorgung, Klima, Biodiversität und Ressourcen führen zu boshafte Problemen, da sie als Herausforderung zumeist deutlich über die Problemdefinition der VDI 2221-1 hinausgehen. Eines der Ziele dieses Buches ist es, dies zu illustrieren. Boshafte Probleme sind durch die folgenden zehn Kriterien gekennzeichnet (Rittel/Webber 1973, eigene Übersetzung, siehe auch Tabelle 2.1):

1. Es gibt keine vollständige oder richtige Beschreibung des Problems. Die Beschreibung ist erst Teil der Lösung, da die Lösung in sich eine bestimmte Definition des Handlungsrahmens, der Akteure, der Ursachen usw. enthält.
2. Es gibt kein eindeutiges Kriterium, wann die Lösung erreicht ist. Die Lösung ist häufig der Zustand, der nach einem gewissen Aufwand eingenommen wird und der nun nach Erschöpfen der bereitgestellten Ressourcen für die Lösungsfindung umgesetzt wird.
3. Lösungen sind weder richtig noch falsch – sie sind gut oder schlecht. Meist sind sie besser oder schlechter. Kriterien für gut und schlecht entstehen häufig aus einem normativen bzw. ethischen Rahmen heraus.
4. Es gibt keine eindeutige Bewertung dafür, wie gut eine Lösung ist. Bei zahmen Problemen lassen sich Abweichungen von der idealen Lösung bestimmen und so einzelne Lösungsvorschläge klassifizieren. Bei boshafte Problemen lässt sich erst im Nachhinein erkennen, welche Folgen die Lösung hat, da die Auswirkungen sich in komplexer Form durch das gesamte beeinflusste System ausbreiten. Häufig kann die umgesetzte Lösung nicht mit anderen Lösungsvorschlägen verglichen werden.
5. Jede Umsetzung zählt bereits voll. Es gibt keine Möglichkeit sich durch Ausprobieren (trial and error) der Lösung anzunähern. Jede umgesetzte Lösung oder Maßnahme hinterlässt Spuren in der Welt, die nicht wieder rückgängig zu machen sind und die jeden nächsten Versuch beeinflussen und verfälschen.
6. Es gibt keine abzählbare oder vollständig beschreibbare Menge an potenziellen Lösungen. Es gibt keine gut beschreibbare Menge an Operationen, mit denen eine Lösung erreicht wird.
7. Jedes boshafte Problem ist einzigartig. Es gibt keine Klassen von ähnlichen oder ähnlich lösbaren boshafte Problemen.
8. Jedes boshafte Problem kann als das Symptom eines anderen boshafte Problems angesehen werden. Daraus folgt, dass die Verbesserung eines Problems Schwierigkeiten erzeugt, das nächste anzugehen.
9. Beschreiben wir ein boshafte Problem als eine Abweichung von einem angestrebten anderen Zustand, dann legen wird dadurch schon Lösungswege fest oder schlie-

ßen mögliche Lösungswege aus. Dies geschieht allein durch die Formulierung (framing) des Problems.

10. Fehler bei der Lösung können oft nicht toleriert werden, da sie direkte Auswirkungen auf die Umstände und das Leben von Menschen haben. Die Lösenden tragen eine hohe Verantwortung, dass ihre Lösung funktioniert.

Damit geht die Definition des boshafte Problems noch deutlich über die Problem-Definition der VDI 2221-1 hinaus. Insbesondere enthalten boshafte Probleme immer gesellschaftliche Auswirkungen oder Rückwirkungen, die nicht einfach aufzulösen sind. Als Kernthese dieses Buches gilt, dass alle relevanten technischen und gesellschaftlichen Probleme zumindest im Hinblick auf eine Transformation unserer Energieversorgung boshafte sind. Einschränkende Rahmenbedingungen entstehen unter anderem

- durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der vielen Möglichkeiten natürliche Grenzen setzt (siehe Kapitel 3),
- durch begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen (siehe Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6),
- die Notwendigkeit, innerhalb planetarer Grenzen zu bleiben (siehe Kapitel 8), sowie
- durch gesellschaftliche und ethische Grenzen.

Die Größe anstehender benötigter Veränderungen und die Komplexität der Verknüpfungen zwischen gesellschaftlichen und technischen Aspekten führt dazu, dass alle Probleme der Großen Transformation unseres Energiesystems boshafte sind (dies klingt fast wie eine Version des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, vielleicht folgt dies auch auf einem verwickelten Wege daraus).

Tabelle 2.1 Einteilung von Problemen

Aspekt	Zahme Probleme (<i>tame</i>), Aufgaben	Boshafte Probleme (<i>wicked</i>)
Problem-beschreibung	eindeutig geschlossen vollständig	Eine eindeutige oder vollständige Beschreibung ist unmöglich. Die Beschreibung hängt von der Perspektive, der Haltung und vom gewählten Lösungsansatz ab. Das Problem kann vollständig nur als Teil einer Lösung beschrieben werden.
Lösung	eindeutig geschlossen	Oft gibt es keine Lösung, sondern nur bessere oder schlechtere Varianten des Umgangs mit dem Problem. Es gibt beliebig viele Lösungsmöglichkeiten.
Abweichung von der Lösung	eindeutig bestimmt Der Fehler kann sofort berechnet werden.	Es ist unklar, wann eine andere Lösung beginnt. Es ist unklar, ab welcher Abweichung der Vorschlag keine mögliche Lösung ist.

Tabelle 2.1 Einteilung von Problemen (*Fortsetzung*)

Aspekt	Zahme Probleme (<i>tame</i>), Aufgaben	Boshafte Probleme (<i>wicked</i>)
(numerische) Simulation	gut geeignet	Eine Simulation ist nie vollständig und das Modell ist unzureichend: Fehlende Aspekte, bewusst oder unbewusst gewählte Annahmen und verwendete Vereinfachungen verfälschen die Simulation. Das Ergebnis kann irrelevant sein.
Beispiel	Anzahl, Masse, Volumen	Was ist die richtige Erziehung meines Kindes? Welche Ausbildung soll ich wählen?

Boshafte Probleme erfassen

In vielen politischen oder technischen Diskussionen werden komplexe boshafte Probleme als einfache zahme Aufgaben dargestellt, für die es direkt eine entsprechend einfache Lösung oder ein Produkt gäbe. Ziel dieses Buches ist es, eine grundlegende, sorgfältige und ethisch angemessene Herangehensweise für boshafte Probleme zu vermitteln und Lösungsvorschläge mit der notwendigen Aufmerksamkeit zu betrachten. Dafür können wir uns diese Fragen stellen:

- Ist das Problem sinnvoll und vollständig beschrieben? Ist die Ursache klar benannt? Ist das Symptom eine Ursache oder eine Folge des Problems?
- Ist der Lösungsvorschlag passend zu dem Problem? Für was dient dieser Lösungsvorschlag? Für wen ist dieser Lösungsvorschlag nützlich?
- Ist das Problem wirklich ein einfaches zahmes Problem, für das es nur diese eine Lösung gibt, oder ist es in Wirklichkeit ein boshafte Problem?

KI Sogenannte künstliche Intelligenz (KI) kann uns hier nicht helfen: KI hat keine vollständige Beschreibung des Problems. KI hat kein Modell, das alle Zusammenhänge und Rückwirkungen abbildet. KI hat kein *skin in the game*. KI erzeugt zwangsläufig Bullshit. KI hat kein Bewusstsein, kann also zu ethischen Themen keine Entscheidung liefern (VDI, 2021; Bridle 2019; Townsen et al. 2024; Zhou et al. 2024). Mehr zu digitaler Technik finden Sie in Kapitel 8.

2.1 Die wissenschaftliche Methode

Um sich von boshafte Problemen nicht verwirren oder überwältigen zu lassen, ist es notwendig, sie strukturiert anzugehen und auf diesem Wege notwendiges Wissen über das Problem, die Verflechtungen des Problems mit anderen Bereichen der Welt und über mögliche Lösungsmöglichkeiten anzusammeln. Hierfür eignet sich die wissenschaftliche Methode besonders, da sie anders als andere Ansätze grundsätzlich syste-

matisch und fehlerorientiert ist und da in der wissenschaftlichen Vorgehensweise das Ergebnis nicht feststeht. Ziel jeder Hochschul-Bildung ist es, wissenschaftlich denken und arbeiten zu können (auch wenn sich dies im Bachelor manchmal eher wie eine Ausbildung anfühlt).

Essenziell sind neben den soliden fachlichen Kompetenzen dabei der kritische Umgang mit Quellen (Abschnitt 2.2) und die Befähigung zur persönlichen Reflexion. Wir benötigen die kritische Distanz zu unseren eigenen Emotionen und Bedürfnissen, um diese daran zu hindern, unser Denken unbewusst zu beeinflussen und Ergebnisse vorwegzunehmen. Gleichzeitig brauchen wir unsere Emotionen als ethischen Kompass.

In der Wissenschaft ist eine fundamentale Annahme, dass die physische Welt existiert und ganz konkret eine eindeutige Form und Gestalt hat, ganz unabhängig davon, wie wir das selbst sehen wollen oder können. Diese reale Welt immer besser zu erkennen, das können und sollen wir versuchen.

Wenn wir die anstehenden boshaften Probleme lösen wollen, dann müssen wir die Welt so wie sie ist und mit allen ihren Herausforderungen und Unannehmlichkeiten möglichst gut verstehen. Der einzige recht sichere Weg dahin, den wir bisher kennen, ist die wissenschaftliche Methode. Die direkte Anwendung und Folge dieser These ist, dass die eigene Meinung nicht der Beginn und nicht das Zentrum der eigenen Theorie von der Welt sein kann. Die Welt orientiert sich nicht an meiner eigenen Meinung, sondern ich muss die Welt erfassen, wie sie ist, um anhand einer guten wissenschaftlichen Analyse der belastbaren Erkenntnisse eine aktuelle Theorie der Welt zu entwickeln. Meine individuelle Theorie ist damit abhängig von meinem aktuellen Verständnis der Welt und ich muss meine Theorie von der Welt immer dann ändern, wenn ich neue belastbare Erkenntnisse bekomme. Immer.



Wissenschaftliche Methode

Die wissenschaftliche Methode ist durch eine grundlegende Haltung und allgemeine Herangehensweise klar definiert:

- Sie sucht Antworten zu Fragen aus der Natur und der Technik, wobei sie dafür immer auf die Natur oder die Technik selbst blickt.
- Sie stellt vorläufige Antworten auf ihre Fragen vor – sogenannte Hypothesen – und testet durch genaue Beobachtung oder durch wiederholbare Experimente, ob und in welchem Umfang diese Hypothesen belastbare Antworten sind. Nur diese Form der Bestätigung von Hypothesen ist anerkannt.
- Alle Ergebnisse, die sich zu einer Theorie als einer Struktur aus verifizierten Hypothesen aufbauen, werden immer als vorläufig angesehen.

Jede Theorie ist nur so lange gültig, bis sie durch neue Beobachtungen oder Experimente widerlegt wird. Solange sie gültig ist, sollen wir sie nutzen – auch auf die Gefahr hin, dass dadurch Widersprüche entstehen. Aus diesen Widersprüchen heraus können wir dann unsere wissenschaftliche Beschreibung der Welt weiter verbessern, indem wir zuerst verstehen, woher die Widersprüche kommen. Danach können wir unsere Theorie so anpassen, dass diese Widersprüche weniger werden oder verschwinden.

Ziel dieses Buches ist es, Fragen immer aus einer wissenschaftlichen Perspektive heraus anzugehen. Dies erfordert oft schon Mut. In vielen Diskussionen sind grundlegende Annahmen gesetzt: Oft gibt es einen gefühlten Konsens, was noch diskutiert werden darf und was schon feststeht. Diesen Konsens infrage zu stellen, kann in einer sozialen Gruppe oder Organisation bereits massive Ablehnung hervorrufen. Viele soziale Gruppen und Organisationen haben Glaubenssätze, die Entscheidungsprozesse vorherbestimmen. Insbesondere in Gruppen ist die Akzeptanz der grundlegenden Glaubenssätze oft die Voraussetzung für Teilhabe. Eine wissenschaftliche Herangehensweise verlangt jedoch, dass wir uns versichern, dass alle unsere Annahmen stimmen. Wir müssen absichern und hinterfragen. Dies ist manchmal unbequem oder schwierig.

Jede Theorie, die nicht durch Experimente oder Beobachtungen in der realen Welt bestätigt oder widerlegt werden kann, ist nicht wissenschaftlich. Im Themengebiet dieses Buches können wir alles durch Experimente oder Beobachtungen bestätigen oder widerlegen.

Jede Theorie, die auch auf übernatürlichen Kräften oder Magie beruht, ist nicht wissenschaftlich. Magie schleicht sich immer wieder in unsere Welt und in unser Denken. Es ist ein mühsamer Prozess, sich immer wieder zu versichern, dass das eigene Denken nicht von letztendlich magischen Erwartungen oder Hoffnungen geleitet wird. In gesellschaftlichen Diskussionen finden sich immer magische Hoffnungen und Erwartungen. Diese Elemente zu identifizieren ist bereits ein großer und anstrengender Schritt.

2.2 Verlässliche Quellen erkennen

Es kann gerade zum Einstieg schwierig sein, zu einem Thema verlässliche Informationen zu bekommen. Wissenschaftliche Fachliteratur müsste zuerst gefunden werden und sie kann als Einstieg schnell zu kompliziert sein. Daher beschreibt dieser Abschnitt weitere mögliche Quellen und soll Ihnen helfen, Ihre Urteilskraft zu stärken.

Viele Kommunikationskanäle folgen der Regel: *„Wer am lautesten schreit, hat Recht.“* Insbesondere im Bereich der Aufmerksamkeits-Ökonomie digitaler Plattformen, in sozialen Netzwerken, der Politik und Formen populärer Berichterstattung wird dies konsequent angewendet: Oft zielen Texte auch direkt auf Emotionen wie Wut und Empörung, die jede kritische Distanz zum Text verhindern sollen (Törnberg/Chueri 2025). Zumeist werden zugleich einfache Lösungen präsentiert, mit denen das angesprochene Problem direkt gelöst würde. Die Lösung (oder die Wahrheit), so unterstellt diese Form der Berichterstattung, werde von bösen, dummen anderen Gruppen oder Medien verhindert. Dabei sind die Informationen über den eigentlichen Anlass bereits stark gefiltert. Insbesondere innerhalb von Meinungsblasen und Echokammern in sozialen Medien verstärken sich diese Emotionen dann schnell – und jedes Netzwerk in sozialen Medien hat die Tendenz, eine solche Echokammer Gleichgesinnter zu sein, denn jede

Form der Abweichung von der allgemeinen Empörung wird dort sofort und nachdrücklich mit sozialer Ächtung bestraft (Bridle 2019). Das ist nicht wissenschaftlich.

Soziale Medien Gängige soziale Medien werden von kommerziell orientierten Akteuren mit starker eigener politischer Agenda zur Verfügung gestellt. Hier ist das erste Ziel, Nutzer:innen möglichst intensiv an das Medium zu binden, um ihnen möglichst viel einträgliche Werbung zeigen zu können. Um dies zu erreichen, sind die verborgenen Algorithmen, die uns Inhalte vorschlagen, so gestaltet, dass sie solche Inhalte liefern, die möglichst gut zu den Interessen und emotionalen Bedürfnissen des Einzelnen passen. Sehr oft sind dies Inhalte mit hohem Sensations- oder Erregungsanteil. Insbesondere ist es den Algorithmen egal, was der Wahrheitsgehalt der einzelnen Inhalte ist – es gibt bewusst keine Unterscheidung zwischen Bullshit und Fakten (zu Bullshit siehe Frankfurt 2020). Wesentlich ist dabei, Nutzer:innen klar zu identifizieren und möglichst genau zu kennen. Durch die Auswahl und Nutzung entsteht so ein Nutzerprofil. Dabei gestaltet das Nutzerprofil dann, was die Nutzer:innen überhaupt noch von der Welt zu sehen bekommen. Wir als Nutzer:innen gestalten uns und unsere Welt damit selber und leben in einer Informationsblase ohne jeden Kontakt zur realen physischen Welt (Bridle 2019).

Originalquelle oder Hörensagen Die wissenschaftliche Methode verlangt eine Herangehensweise, die dieser Beschreibung der Welt und dieser Form der Informationsbeschaffung diametral entgegenläuft. Insbesondere verlangt eine wissenschaftliche Herangehensweise zuerst einmal, die Originalquellen zu kennen und zu bewerten. Bevor ich mich als Leser:in von der erwarteten Empörung über einen schrecklichen neuen Gesetzentwurf überwältigen lasse, lese ich den Originalentwurf erst einmal und beginne ihn mit meinen eigenen Kriterien zu analysieren. Falls mir zum Verständnis des Textes Informationen fehlen, so recherchiere ich diese, wenn möglich unter Nutzung weiterer wissenschaftlicher Quellen. Zu jeder Quelle nehme ich dabei eine kritische Distanz ein. Diese kritische Distanz zeigt sich darin, dass ich nicht blind glaube, was in der Quelle steht, sondern anhand von Argumenten überzeugt werden möchte.



Quellen kritisch betrachten

Bei der kritischen Betrachtung von Quellen sollten wir uns folgende Fragen stellen:

- Ist die Quelle in sich schlüssig?
- Gibt sie andere Quellen, Beiträge oder Meinungen richtig und ausreichend vollständig wieder?
- Stellt sie andere Beiträge ausreichend klar und richtig in den notwendigen Zusammenhang?
- Sind die hier verwendeten Methoden geeignet, das Thema zu bearbeiten?
- Können die Ergebnisse stimmen?
- Sind die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen logisch hergeleitet?
- Sind die Beweggründe der Autor:innen nachvollziehbar und ausreichend klar offengelegt?
- Sind Analyse und Meinung voneinander zu unterscheiden?

Studien Gute Studien sind belastbare wissenschaftliche Darstellungen. Dies gilt, wenn sie von einem unabhängigen Forschungsinstitut durchgeführt werden und wenn der Auftraggeber das Ergebnis nicht vorgegeben hat. Gute Studien folgen der Logik wissenschaftlicher Texte und legen alle Rahmenbedingungen offen. Gute Studien sind vollständig, d. h., sie enthalten auch Informationen über abweichende Ergebnisse und Interpretationen, misslungene Versuche, Schwierigkeiten bei der Durchführung.

Journalistische Texte

Diese Texte folgen einer anderen Logik und sind daher als belastbare Quellen nicht immer geeignet: Oft versuchen die Autor:innen ihre „Objektivität“ dadurch zu dokumentieren, dass sie den Gegenstand, über den sie berichten, als Streit zwischen zwei Polen darstellen (Dean 2012). Dies ist eine Darstellungsform, die aus der Berichterstattung über Politik stammt und die bereits dort nicht geeignet ist, um Probleme oder Entwicklungen zu beschreiben (als falsche Ausgewogenheit). Diese Sichtweise muss im Hinblick auf die Themen dieses Buches sehr kritisch bewertet werden: Ist die Position, über die eigentlich berichtet werden soll, ein wissenschaftlicher Konsens, so bleibt den Autor:innen, wenn sie einen Gegensatz haben wollen, nichts anderes übrig, als sich eine zweite Position zu suchen, die weit außerhalb des wissenschaftlichen Konsenses liegt. Solche weit außerhalb des wissenschaftlichen Konsenses liegenden Positionen finden sich heute über das Internet problemlos: Selbstdarsteller:innen, Quacksalber:innen, Magier:innen, Händler:innen des Zweifels (Conway/Oreskes 2012) oder gecastete Pseudowissenschaftler:innen bieten sich dort an. Während Wissenschaftler:innen von *Wahrscheinlichkeit* sprechen müssen (siehe Kasten), darf die Gegenseite *absolut überzeugt* sein. Im Gegensatz zu Wissenschaftler:innen muss sie auch nicht über ihre Interessenkonflikte berichten oder selbst offensichtliche Eigeninteressen werden einfach ausgeblendet. Was objektive Berichterstattung sein möchte, wird schnell zu einem Vehikel der Unwahrheit bzw. schafft erst den Raum dafür, eigentlich unsinnige Positionen zu verbreiten. Dazu kommt, dass Journalist:innen teilweise gezwungen sind, über Themen zu berichten, zu denen sie keinen eigenen fachlichen Zugang haben. Sie sind daher manchmal nicht in der Lage, offensichtlich Falsches, Unwahrheiten, Bullshit oder Unsinn zu erkennen. Dies gilt umso mehr, wenn es sich um schnelle Berichterstattung handelt.

Gute journalistische Texte trennen scharf zwischen Bericht und Meinung. Der vorige Absatz beleuchtet die Gefahr einer scheinbar „objektiven“ Darstellung, die Themen auf gegensätzliche Pole reduziert. Dies kann auch in einem ansonsten sauberen und faktenbasierten Text auftauchen, der klar keine eigene Meinung enthält. Die Meinung könnte sich dann in einem als Kommentar gekennzeichneten Text an anderer Stelle finden. Allerdings wird diese saubere Vorgehensweise inzwischen auch in Qualitätsmedien nicht immer durchgehalten, Meinung und Bericht gehen dann ineinander über. Viele Medien verzichten schon mit Rücksicht auf Umsatz oder die politische Agenda ihrer Eigentümer:innen auf Minimalstandards und beginnen mit der Emotion (Törnberg/Churi 2025).



Wahrscheinlichkeit und Sicherheit beschreiben

Wissenschaftliche Texte haben eine geordnete Form, um auszudrücken, wie sicher eine Aussage oder wie bedeutsam ein Ergebnis ist. Die Formulierung „sehr wahrscheinlich“ mag umgangssprachlich mit 20 % Eintrittswahrscheinlichkeit an einem guten Tag bewertet sein, meint in einem wissenschaftlichen Text jedoch einen Wert deutlich über 90 %.

Dass wissenschaftliche Texte ihre Aussagen in Wahrscheinlichkeiten kleiden, ist kein Hinweis darauf, dass die Sachlage ganz anders sei, sondern folgt aus der eigenen Logik der Wissenschaft, die immer eine Annäherung an die Welt darstellt und akzeptiert, dass Dinge anders sein können. Damit sind Aussagen aus wissenschaftlichen Artikeln wesentlich belastbarer, wahrer und nützlicher als sogenannte ultimative Wahrheiten aus anderen Quellen.

In wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden die Wahrscheinlichkeit und die Sicherheit von Aussagen oft verbal ausgedrückt. Die Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sind hier ein gutes Beispiel. Tabelle 2.2 listet die dort verwendeten Begriffe und ihre Definition für die Wahrscheinlichkeit zusammen mit einer Übersetzung auf. Ausgehend von zwei unabhängigen Parametern, einmal der vorhandenen Evidenz für eine Aussage und einmal dem Maß an Konsens zwischen den beteiligten Experten (Bild 2.1), wird zusätzlich das eigene Vertrauen oder die Sicherheit definiert, mit der eine Aussage in den Berichten des IPCC getroffen wird. Diese Klarheit und Nachverfolgbarkeit macht gute wissenschaftliche Quellen aus.

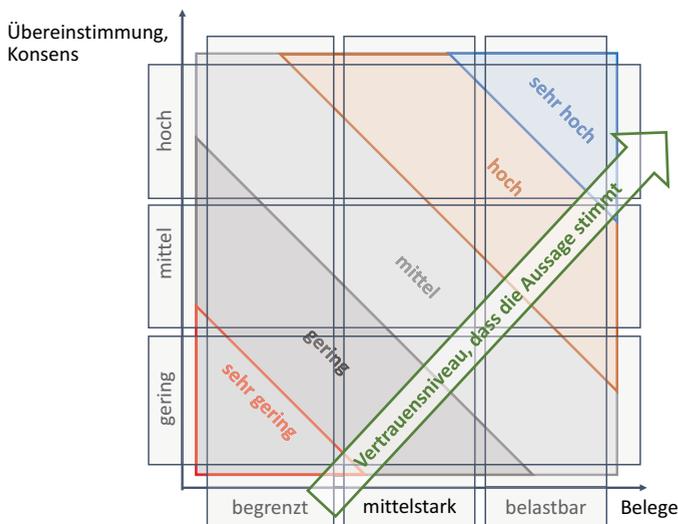


Bild 2.1 Der Vertrauensgrad für eine Aussage (confidence) hängt von den Aspekten der Übereinstimmung (im Gremium) und der Belege (welche, wie gut, wie zuverlässig, wie konsistent) ab (in Anlehnung an Mastrandrea et al. 2010).

Tabelle 2.2 Normierte Begriffe des IPCC, um die Eintrittswahrscheinlichkeit (likelihood of the outcome) auszudrücken (Quelle: Mastrandrea et al. 2010)

Begriff (EN)	Übersetzung (DE)	Eintrittswahrscheinlichkeit
virtually certain	praktisch sicher	> 99 %
extremely likely	extrem wahrscheinlich	> 95 %
very likely	sehr wahrscheinlich	> 90 %
likely	wahrscheinlich	> 66 %
more likely than not	eher wahrscheinlich als nicht	> 50 %
about as likely as not	etwa ebenso wahrscheinlich wie nicht	33 % bis 66 %
unlikely	unwahrscheinlich	< 33 %
very unlikely	sehr unwahrscheinlich	< 10 %
extremely unlikely	extrem unwahrscheinlich	< 5 %
exceptionally unlikely	besonders unwahrscheinlich	< 1 %

Wissenschafts- und Technikjournalismus Eine eigene Schwierigkeit entsteht bei Berichten über neue technische Entwicklungen: Damit Wissenschaftler:innen Aufmerksamkeit gewinnen, müssen sie ihre Ergebnisse als direkt relevant darstellen. Journalist:innen wiederum finden es ausgesprochen schwierig, über einen Fortschritt zu berichten, der nicht direkt und konkret umsetzbar ist. Dadurch entsteht die Gefahr, dass das Potenzial einer Erfindung oder Entdeckung in ihrem Bericht deutlich übertrieben wird. Dieser Effekt erklärt das häufige Auftreten von ultimativen Lösungen und Wunderwaffen in der Presse. Dieses Bedürfnis wird zusätzlich von Start-ups ausgenutzt, um sich nach vorne zu drängen und Kapital einzuwerben: Haltlose Versprechen werden dankbar aufgenommen (und die massiven Einschränkungen im Kleingedruckten glatt übersehen).

Lesen wir unkritisch durch den Technikteil, dann werden wir alle bald mit autonomen Taxis zum Mond reisen und unsere Bodenschätze vom Neptun beziehen. Es entsteht der Eindruck, dass es zu allen Problemen technische Lösungen gibt, die eigentlich morgen früh schon ausgerollt werden. Ein Teil der Leser:innen fühlt sich bestätigt in ihrer optimistischen Sicht auf die Zukunft, ein anderer Teil der Leser:innen wird zynisch, da sich diese Wunderdinge dann bald in Luft auflösen. Solche Berichte haben immer einen wahren Kern (eine Studie oder einen geplanten Versuch in einem ersten Demonstrator), es wurde nur alles optimistischer und viel einfacher dargestellt, als es tatsächlich ist. Hier hilft nur, die Originalquelle zu suchen und selbst zu bewerten (Dean 2012).

Wert journalistischer Beiträge Kriterien für gute journalistische Arbeit sind z. B. im Pressekodex des Deutschen Presserates dargestellt. Diese Anforderungen können direkt als Maßstab verwendet werden, um zu bewerten, ob wir einen journalistischen Beitrag, einen Blogbeitrag oder ein Video als Quelle nutzen können. Gute journalisti-

sche Quellen haben einen sehr hohen Wert, um aktuelle Entwicklungen zu verfolgen, wie die politische Umsetzung von Maßnahmen. Allerdings ist tagesaktuelle Berichterstattung zugleich kaum in der Lage, langfristige Trends oder Ursachen zu erkennen, sodass hier beide Perspektiven wichtig werden: Hier liefern erst wissenschaftliche Texte oder langfristig angelegte journalistische Beiträge wichtige Sichtweisen.

Journalistische Beiträge bieten im besten Falle die bedeutsame Möglichkeit, persönliche Sichtweisen und Erfahrungen kennenzulernen. Wissenschaftliche Literatur muss aus methodischen Gründen darauf zumeist verzichten. Erst durch die persönliche Erfahrung und Sicht von wesentlichen Akteur:innen und Betroffenen kann ein vollständiges Bild entstehen. Wir benötigen diese Sichtweisen insbesondere, um einen Mangel an Vorstellungsvermögen zu verhindern, der gerade viele Einlassungen zu den Themen dieses Buches ausmacht.



Den deutschen Pressekodex in der aktuellen Form finden Sie hier: <https://www.presserat.de/pressekodex.html>

Der Kern ist die Achtung der Wahrheit und Menschenwürde: *„Die Achtung vor der Wahrheit, die Wahrung der Menschenwürde und die wahrhaftige Unterrichtung der Öffentlichkeit sind oberste Gebote der Presse. Jede in der Presse tätige Person wahrt auf dieser Grundlage das Ansehen und die Glaubwürdigkeit der Medien.“*

Weitere wichtige Aspekte des Kodex sind Sorgfalt der Recherche, Trennung von Tätigkeiten sowie die Trennung von Werbung und Redaktion. Dies und weiteres dort Festgelegtes gelingt nicht allen Medien. Einige Medien positionieren sich bewusst deutlich außerhalb davon.

Politik

In der Politik findet sich verbreitet eine Weltsicht, die davon ausgeht, dass alle Fakten verhandelbar sind. Verhandelbar meint, dass Fakten das Ergebnis einer Aushandlung darstellen, bei der Stärkere über Geld, Einfluss, Macht, Drohungen oder Zwang die „Fakten“ für alle bestimmen.

Dementsprechend ist in der Politik oft die Meinung festgelegt, oder die Meinung ist nicht an Fakten im Sinne wissenschaftlicher Erkenntnisse orientiert. Damit werden dann eventuelle Fakten der jeweiligen herrschenden Meinung angepasst. Autokratische Regimes zeigen dieses Verhalten besonders klar und deutlich. Ein Kennzeichen autokratischer Regimes ist die Schwächung oder Zerstörung wissenschaftlicher Institutionen. Gleichzeitig finden wir meinungsstarke Politiker:innen mit geringem Respekt vor wissenschaftlicher Erkenntnis und geringer Befähigung zum Hinterfragen der eigenen Position überall. Diese Meinungsstärke und der damit verbundene gnadenlos ichbezogene Durchsetzungswille werden gerne als Charakterstärke angesehen, obwohl sie besser als Ignoranz, Dummheit oder in Kategorien psychiatrischer Diagnosen zu fassen wären. Dies ist keine hilfreiche Position oder bevorzugte Me-

thode, um die Herausforderungen einer zukünftigen nachhaltigen Entwicklung anzugehen, sondern gefährdet unsere Zukunft (DeLay 2024).



Struktur wissenschaftlicher Fachartikel

Wissenschaftliche Artikel folgen einer etablierten Struktur und argumentieren mit Logik. Dazu verwenden sie eine bestimmte Sprache. Beides unterscheidet sie deutlich von anderen Formen der schriftlichen Kommunikation. Die Struktur eines wissenschaftlichen Artikels ist klar festgelegt, damit Leser:innen möglichst genau die Argumentation verstehen können, damit sie die Argumente im Detail nachvollziehen können (wenn sie dies möchten). Im Kern geht es darum verstehen zu können, wie die Autor:innen zu ihren Schlussfolgerungen gelangt sind:

1. Die Fragestellung und die Motivation der Untersuchung wird klar zu Beginn dargestellt: Was wird wozu analysiert?
2. Es wird ein Überblick über die relevante Literatur und den Stand der Forschung gegeben. Der Fokus liegt auf Grundlagen, die als gemeinsamer Konsens gelten, sowie auf wichtigen aktuellen Beiträgen. In Bezug auf das analysierte Problem werden Lücken im Wissen, offene Fragen und auch Streitpunkte angegeben, wenn dies relevant ist.
3. Die verwendeten Methoden werden so dargestellt (oft mit Verweis auf andere Literatur), dass die Leser:innen diese Methoden selbst anwenden können – sie also letztendlich die Untersuchung eigenständig wiederholen können.
4. Die Ergebnisse der Analyse werden übersichtlich dargestellt. Dabei handelt es sich um eine rein faktische Darstellung von Daten, Zahlen, Berechnungen, Simulationen.
5. In der Bewertung werden die Ergebnisse im Hinblick auf die Fragestellung analysiert. Erst hier wird versucht, eine Antwort auf die wissenschaftliche Frage zu geben. Hier können aus den so entstandenen Hypothesen Handlungsempfehlungen entwickelt werden. Die Untersuchungen anderer fließen hier ein, werden bestätigt, erweitert oder verworfen.
6. Am Ende des Artikels stehen die Schlussfolgerungen, die sich logisch aus dem Vorherigen entwickeln sollen.

Diese logische Struktur zu erzwingen und dafür zu sorgen, dass die Argumentationskette in sich schlüssig und verständlich wird, ist die Aufgabe des Peer-Review-Verfahrens, dem die allermeisten wissenschaftlichen Artikel unterworfen werden. Peer Review bedeutet, dass Fachkolleg:innen den Artikel vor seiner Veröffentlichung kritisch gegenlesen und dahingehend beurteilen, ob er für eine Publikation aufgrund der genannten Kriterien geeignet ist oder wie er überarbeitet werden müsste, damit er veröffentlicht werden kann.

Die Sprache von wissenschaftlicher Literatur ist sehr sachlich und zurückhaltend. Das Ziel der Darstellung soll es sein, die kritischen Leser:innen gerade nicht mit Emotionen zu verwirren, sondern ihnen den fachlichen Zugang möglichst einfach zu machen. Der Respekt vor Leser:innen findet darin Ausdruck, dass sie angehalten sind, eigene Schlussfolgerungen zu treffen.

2.3 Gesellschaftliche Aspekte technischer Veränderungen

Boshafte Probleme und ihre Lösungsvarianten haben die Eigenschaft, Betroffene zu erzeugen und Interessen zu verletzen. Damit wird die frühe Kommunikation dieses Aspekts wichtig. Not In My Backyard (NIMBY) und auch Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anything (BANANA) beschreiben gegenwärtige gesellschaftliche Trends. Es findet sich immer eine Gruppe, die begründet, warum etwas zwar vielleicht eigentlich gut sei, nur eben nicht hier oder nicht jetzt. Diese Gruppen finden meist gut Gehör, sie machen sich gut in medialen Systemen oder bedienen Erwartungen und Interessen anderer. Manchmal thematisieren sie Aspekte, die bedenkenswert sind, aber entweder bisher übersehen oder nicht kommuniziert wurden. Manchmal werden sie von anderen Interessen instrumentalisiert. Manchmal gleiten sie in ihre eigene soziale Echokammer ab und sind selbst Argumenten von außen nicht mehr zugänglich. Manchmal wird etwas auch einfach instrumentalisiert.

Aufgrund der geringen Leistungsdichte der natürlichen Energieströme ist es nicht möglich, Infrastruktur zur Bereitstellung von Energie und zur Herstellung von Elektrizität aus nachhaltigen Quellen klein zu machen. Aufgrund der Leistungsverluste beim Transport von Elektrizität über längere Strecken ist es angemessen, Erzeugung und Bedarf räumlich zu koppeln. Hier liegt ein grundsätzlicher Konflikt vor, der zumeist rein technisch nicht gelöst werden kann, sondern gesellschaftlich ausgehandelt werden muss.



Bild 2.2 Energielandschaft Eemshaven, Niederlande

Bild 2.2 zeigt Eemshaven in den Niederlanden aus 30 km Entfernung. Eemshaven liegt weit ab von allen Bevölkerungszentren der Niederlande. Dort befinden sich ein Kohlekraftwerk (Nennleistung 1560 MW, vorgeblich CCS-Ready, siehe Kapitel 14), insgesamt acht kombinierte Gasturbinen- und Dampf-Kraftwerke (GUD), von denen drei mit einer gemeinsamen Nennleistung von 1311 MW in Bild 2.2 zu sehen sind (die fünf weiteren GUD-Kraftwerke haben eine weitere Nennleistung von zusammen 1750 MW), und ca. 50 Windturbinen (Nennleistung zusammen 156 MW). Bild 2.2 stellt die Größenverhältnisse und den Platzbedarf der einzelnen Technologien gut dar. Es illustriert auch,

wie eine Gesellschaft ihre Energieerzeugung an den dünn besiedelten Rand und aus dem Blick der Bevölkerung räumt. Dort in der Peripherie entstehen dann Opferlandschaften, die wir im Zentrum ungern nahe bei uns hätten (Brandt/Wissem 2017).

In unserer Gesellschaft fehlt es an einem Verständnis für die Größenordnung von Energiemenge oder Energiebedarf. Dies nutzt (populistische) Politik schamlos aus. Viele diskutierte Vorschläge zeigen, dass die Größenordnung des eigenen Bedarfs, des Bedarfs der eigenen Stadt oder des eigenen Landes nicht verstanden wird. Hier hilft uns nur weiter, diese Zahlen zu berechnen, zu nennen und gut zu illustrieren. Das Weitere soll Ihnen für diese Aufgabe hilfreiche Daten und Methoden geben.



Energiebedarf

Ein Mensch benötigt für seine Versorgung mit Energie über Lebensmittel etwa 100 W oder 10 MJ am Tag, um selbst am Leben und gesund zu bleiben. Dies entspricht in etwa einem Kilogramm an Brot (Bild 2.3). Der jährliche Pro-Kopf-Primärenergie-Umsatz liegt in Deutschland bei 45 000 kWh. Dies entspricht dem Brennwert von 45 solchen Broten für jeden von uns am Tag. Unsere Technik benötigt 45-mal so viel wie wir. Für den jährlichen Pro-Kopf-Endenergie-Umsatz von 31 000 kWh würden wir für jeden von uns etwa 30 Energiesklaven benötigen, die diese Arbeit für uns verrichten.



Bild 2.3
Täglicher Energiebedarf
eines Menschen

2.4 Was wissen wir?

In einer einfachen Darstellung lassen sich vier Kategorien des Wissens finden (Bild 2.4). Hierbei sind es zwei Achsen, die bestimmen, was wir wissen:

1. Die einfache Achse des tatsächlich Gewussten: Was ist an Wissen und Erkenntnis real vorhanden und nutzbar?
2. Die schwierige Achse dessen, was wir über unseren Stand des Wissens wissen und wissen wollen

Daraus entwickeln sich die vier Kategorien in Bild 2.4:

- **known knowns:** Die erste Kategorie ist das etablierte sichere Wissen, wobei dieses Wissen zumindest aus einer neugierigen oder wissenschaftlichen Grundhaltung heraus stetig verändert, erweitert und angepasst wird. Neue Erkenntnisse müssen integriert werden, alte Gewissheiten lösen sich auf und insbesondere Kompetenzen gehen mit der Zeit verloren.
- **known unknowns:** Bei der zweiten Kategorie handelt es sich um bekannte Wissenslücken. Im besten Falle strengen wir uns an, diese zu füllen, oder wenden uns an Menschen, die diese Aufgabe für uns übernehmen können. Natürlich wird jede Lücke, die wir füllen, dazu führen, dass unser etabliertes Wissen sich verändert. Daher werden schon hier erste Abwehrschlachten geführt, die Lernen verhindern sollen.
- **unknown unknowns:** Bei der dritten Kategorie handelt es sich um all die Dinge, von denen wir objektiv nicht wissen können, dass wir sie nicht wissen. Diese Quelle echter Überraschungen darf aktuell als eher kleiner eingeschätzt werden.
- **das Verdrängte:** Die vierte Kategorie ist das Wissen, das wir haben, ja haben müssen, aber das wir bewusst oder unbewusst und immer auf eigene Gefahr ignorieren. Möglichst viel unseres schwierigeren oder kritischeren Wissens hierhin zu verschieben, das ist das Ergebnis unserer eigenen Trägheit und das Ziel von Trolen, Populist:innen und Händler:innen des Zweifels.

In Kapitel 8 sehen wir uns an, was für Möglichkeiten wir haben, eine gute Zukunft zu gestalten. Dabei wird wesentlich, dass wir uns Ignoranz nicht leisten können, wenn wir eine menschliche und gute Zukunft gestalten wollen. Das eigene verdrängte Wissen gering zu halten, setzt Reflexionsvermögen, Bescheidenheit und eine sehr geringe Bullshit-Toleranz bei uns allen voraus.

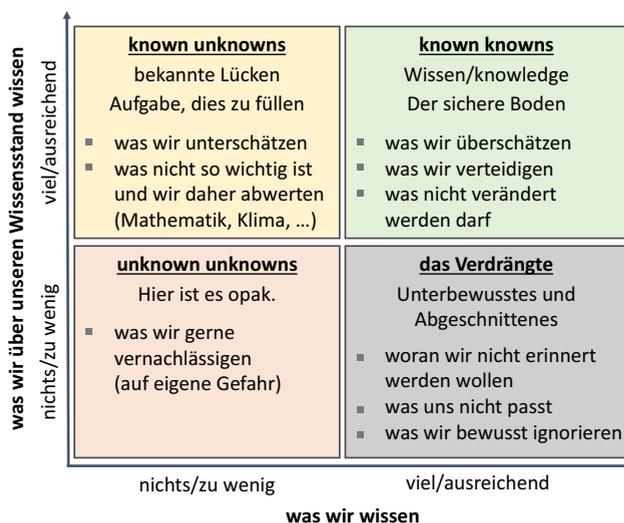


Bild 2.4

Ein Portfolio unseres Wissens

2.5 Umwelt und Technik

Wir Menschen, unsere Umwelt und unsere Technik – dies sind keine getrennten Sphären, sondern alle drei existieren nur gemeinsam im System Erde und wirken eng zusammen. Deshalb benutzt die wissenschaftliche Methode dieselben Theorien für ihre Beschreibung und Analyse. Für alle drei gelten dieselben Naturgesetze.

Längst als falsch abgehandelte, aber immer noch wirkmächtige Denksysteme in der westlichen Welt trennen zwischen dem Menschen und seiner Technik, zwischen Körper und Geist sowie zwischen Mensch und Natur als seiner Umwelt. Betrachten wir die Welt aus einer thermodynamischen Perspektive, so ist es möglich, Menschen oder Menschen mit ihrer Technik als ein System zu beschreiben. Allerdings sind es offene Systeme, die im direkten und sehr engen Austausch mit ihrer (lebendigen) Umwelt stehen:

- Die drei Systeme sind im stetigen und sehr engen Austausch von Stoffen. Nichts bleibt auf einen Bereich beschränkt.
- Energie durchzieht alle drei Bereiche und fließt über alle ihre Systemgrenzen.
- Über den Austausch von Energie und Entropie erfolgt der Austausch von Wirkungen im gemeinsamen System Erde. Gleichzeitig kann der Austausch von Entropie genutzt werden, um die Auswirkung des eigenen Handelns in der Welt zu beschreiben.

Das gemeinsame System ist die kritische Zone unserer Erde (der Bereich der Erde voller Leben) und wir sind absolut abhängig vom Zustand dieser kritischen Zone. Eine sinnvolle Hierarchie der Systeme kann nicht gelingen, jedoch sind wir Menschen mit unserer Technik und unserem Wirtschaften ein inzwischen sehr großer und wirkmächtiger Teil des Systems Erde.

Anthropozän Umwelt und Technik interagieren miteinander an all ihren Schnittstellen und in einer nicht überschaubaren Vielfalt von Prozessen. Aufgrund der Masse, der Größe und des Umfangs an energetischen Strömen der Erde, die durch die Technik fließen, sind diese Interaktionen und ihre Rückwirkungen für das System Erde überwältigend. Die Umweltauswirkungen menschlicher Technik auf das begrenzte und inzwischen im Vergleich kleine System Erde haben kurz- und langfristige Folgen für unser System Erde: Hierfür wurde inzwischen der Begriff des Anthropozäns geprägt. Anthropozän beschreibt das Wirken von uns Menschen als ein stattfindendes geologisches Ereignis mit massiven globalen Auswirkungen in allen Bereichen der (für uns) kritischen Zone der Erde. Spannend ist dabei die wissenschaftliche Diskussion zur Frage, ab wann Menschen so viel Einfluss auf das System Erde genommen haben, dass wir dies als eigene erdgeschichtliche Epoche ansehen können (Zalaszewicz et al. 2024).

Das Ziel dieses Buches ist, Methoden bereitzustellen, mit denen wir Lösungsmöglichkeiten für eine zukünftige Energietechnik unter den Bedingungen des Anthropozäns und innerhalb planetarer Grenzen bewerten können. Dazu müssen die Umweltauswir-

kungen menschlichen Handelns Teil dieser Bewertung sein. Um dies zu tun, ist es notwendig, sie zu verstehen, sie abschätzen und beurteilen zu können.



Auswirkungen

Die Auswirkungen unseres menschlichen Handelns, das immer Handeln mit Technik ist, können wir wie folgt unterteilen:

1. Es gibt die gewollte Auswirkung, d. h., das, was eigentlich vorgesehen und geplant wurde.
2. Darüber hinaus existieren die Auswirkungen, die zwar nicht gewünscht sind, die allerdings vorhergesehen und billigend in Kauf genommen werden (Kollateralschäden wie z. B. Klimaerwärmung als Folge der Nutzung von fossilen Brennstoffen).
3. Außerdem gibt es die direkten ungewollten Auswirkungen. Dies sind unvorhergesehene Auswirkungen des Handelns, die entstehen, da bei der Planung etwas übersehen wurde, über bestimmte Zusammenhänge nicht nachgedacht wurde oder weil Zusammenhänge im System Erde nicht bekannt waren
4. Ungewollte systemische Auswirkungen entstehen aus übersehenen Wechselwirkungen zwischen dem bewusst veränderten Teilsystem und anderen Systemen. Sehr oft sind diese möglichen Wechselwirkungen nicht berücksichtigt worden oder wurden falsch eingeschätzt.
5. Des Weiteren gibt es zukünftige Auswirkungen der gewollten Handlung, die erst durch Skaleneffekte zur Geltung kommen können. Dies umfasst den Technology Lock-in, also das langfristige Festlegen auf eine bestimmte Technologie oder einen bestimmten Standard durch erste Ausführungen. Ein Beispiel ist die 1435-mm-Normalspurbreite der Eisenbahn, die heute nicht einfach geändert werden kann. Hier enthalten sind auch solche Auswirkungen, die erst dadurch entstehen, dass sich über lange Zeiträume etwas anhäuft (akkumuliert) und so erst langsam merkbar wird (toxische Stoffe, siehe Adam 2024), sowie langsame Reaktionen komplexer nichtlinearer Systeme (ozeanische Strömungen).
6. Und zuletzt existieren grundsätzlich unbekannte Auswirkungen. Während alle anderen Wirkungen bei ausreichender Sorgfalt der Planung absehbar gewesen wären oder zumindest mit zunehmendem Erkenntnisgewinn offensichtlich werden, treten diese Wirkungen plötzlich und unvermutet auf. Diese dürfen nicht mit verleugneten Zusammenhängen verwechselt werden, die bereits weiter oben enthalten sind.

Wahrnehmen Übliche gesellschaftliche Formen des Umgangs mit den ungewollten Umweltauswirkungen, insbesondere den unberücksichtigten, langfristigen, schwierigen oder fordernden Auswirkungen, sind zumeist:

- **Verleugnen:** „Nein, so etwas gibt es nicht“, „Das ist alles Panikmache irrer Fanatiker“, „99,9 % aller Wissenschaftler und Experten haben unrecht“, ...
- **Ignorieren (als eine Form des Verleugnens, DeLay 2024):** „Das ist nicht mein Fachbereich“, „Das ist nicht meine Verantwortung“, „Es gibt nun wirklich Wichtigeres“, „pragmatisch und mit Augenmaß“, ...

- **Hoffen und Glauben (als eine weitere Form des Verleugnens, DeLay 2024):** „Das wird jemand anderes lösen“, „Das wird schon nicht so schlimm sein“, „Ich bin Technikoptimist“, „Entrepreneure werden was erfinden“, ...

Es gibt eine Reihe von aktuellen Angeboten zum Glauben. Viele Ideologien haben phantasievolle Ideen, warum es das Problem nicht gibt, warum es irrelevant ist oder warum es ganz von allein verschwindet, wenn wir den richtigen Prophet:innen folgen.

- **Mangel:** Relevant sind der Mangel an Vorstellungsvermögen (Ghosh 2017), der Mangel an Aufmerksamkeit oder konzentriertem Nachdenken sowie der Mangel an Bescheidenheit.
- **Aufgeben:** Dazu zählen Verzweiflung, Apathie und Zynismus. Das uralte Thema der Unverbesserlichkeit des Menschen oder der Jugend gehört hier mit hinein, genauso wie eine Bequemlichkeit des eigenen Denkens und Handelns.
- **Akzeptieren:** Aktiv und bewusst den Zustand annehmen und damit umgehen. Gemeint ist zum Handeln und zum Weitermachen kommen, also in einem gewissen Sinne der normale Ingenieuransatz: (i) das Problem verstehen → (ii) Lösungsansätze erarbeiten → (iii) Bewertungskriterien festlegen → (iv) Lösungsansätze bewerten und auswählen → (v) umsetzen → (vi) geeignet reagieren, wenn es nicht so klappt wie geplant.

Dieses Buch fokussiert auf die letzte Herangehensweise. Es enthält viele Ansätze und Methoden, um Probleme und Lösungsmöglichkeiten zu fassen und sie beschreibbar zu machen. Dabei liegt der Schwerpunkt im Bereich der Bewertungskriterien und damit dem Bewerten und Vergleichen von Lösungsmöglichkeiten. Nur die letzte Möglichkeit basiert auf echter Charakterstärke, da sie verlangt, den wirklich unangenehmen und schwierigen Dingen bewusst ins Auge zu sehen und sich ihnen bewusst zu stellen.

2.6 Methodisch Lösungen finden

Entscheidungen können aus ganz unterschiedlichen Gründen gefällt werden. Als Ingenieur:innen erlernen Sie ganz spezifische Perspektiven und Methoden, um zu guten Entscheidungen zu kommen. Gute Ingenieur:innen verfügen über eine gewisse Bescheidenheit, die es ihnen erlaubt, lieber systematisch und unter Nutzung dieser Methoden vorzugehen. Diese Werkzeugsammlung soll helfen, Lösungen geeignet und vergleichbar zu analysieren. Sie soll helfen, Lösungen gegeneinander abzuwägen und zu bewerten. Sie will so einen Beitrag leisten, in schwierigen Situationen einen klaren Kopf zu behalten und den Weg auch im Halbdunkel finden zu können. Die grundlegende VDI-Richtlinie zur Konstruktionsmethodik, die VDI 2221-1, diskutiert genau dies und will handelnde Ingenieur:innen durch ein methodisches Vorgehen vor nicht ausreichend durchdachten, dummen oder gefährlichen Schnellschüssen bewahren. Wir

als Anwender:innen der Richtlinie sollen durch eine bewusste Verlangsamung des Entscheidungsprozesses gezwungen werden, in einem ersten Schritt belastbar zu analysieren und erst spät, und dann aus nachvollziehbaren Gründen, eine Entscheidung zu treffen. Den gleichen Zweck haben Kernelemente der Managementnormen wie die ISO 9001 oder die ISO 14001. Aus den Gesellschaftswissenschaften kommen Methoden wie die Delta-Analyse (Bizer/Führ 2014), die auch dieses Ziel haben. Sie alle folgen derselben Logik und sind direkt ineinander übertragbar.

Die relevanten Schritte sind in Anlehnung an VDI 2221-1 sowie Bizer und Führ in Tabelle 2.3 dargestellt (Bizer/Führ 2014). Hierbei ist für die Anwendung wesentlich, dass dies kein linearer Prozess der Abarbeitung ist, sondern dass jeder Schritt auch Rückwirkungen auf vorherige Schritte und Ergebnisse hat. Damit kann jeder einzelne Arbeitsschritt die vorherigen Schritte wieder beeinflussen. Insbesondere muss die Definition des Ziels mit dem Prozess angepasst und die Beschreibung des Ist-Zustands erweitert werden, wenn neue Erkenntnisse oder neue Kriterien auftauchen. Das Vorgehen verlangt gedankliche Flexibilität aller Beteiligten, Gutwilligkeit und oft einen Aushandlungsprozess. Andere Darstellungen dieser Methodik können mehr oder weniger Schritte benennen, sind aber im Kern vergleichbar.

Weitere Voraussetzungen für dieses Vorgehen sind immer:

- Die Gruppe oder die Organisation, die so vorgeht, ist ehrlich zu sich selbst.
- Alle Ziele werden klar benannt oder werden sauber mitentwickelt.
- Die zugrunde liegenden Werte sind bewusst und benannt.
- Die Gruppe oder Organisation und ihre Mitglieder sind lernfähig, diskursfähig und konsensfähig. Dies gilt insbesondere auch für die Führung.
- Der Prozess ist ergebnisoffen.
- Ziele und Kriterien werden im Sinne einer Lernkurve angepasst und optimiert. Ziele und Kriterien werden nicht verbogen, um eine bevorzugte Lösung hinzulügen.

Dabei gelten alle Hinweise und Randbedingungen für boshafte Probleme (siehe Beginn von Kapitel 2).

Tabelle 2.3 Die allgemeine Herangehensweise zur evidenzbasierten Lösungsfindung: Lösungen können technisch, organisatorisch oder verhaltensbasiert sein

Nr.	Schritt	Kernfrage
1	Ausgangssituation beschreiben	Wo stehen wir heute? Was sind feste vorgegebene Rahmenbedingungen und Werte? Welche Kompetenzen sind bereits vorhanden?
2	Ziel beschreiben	Wo wollen oder müssen wir hin? Was soll unsere Lösung können, machen oder erwirken?

Tabelle 2.3 Die allgemeine Herangehensweise zur evidenzbasierten Lösungsfindung: Lösungen können technisch, organisatorisch oder verhaltensbasiert sein. (Fortsetzung)

Nr.	Schritt	Kernfrage
3	Ist-Situation beschreiben	Warum ist es heute so, wie es ist? Was ist am heutigen Zustand nicht gut und soll daher geändert werden? Was ist am heutigen Zustand gut und soll so bleiben, wie es ist? Welche Kriterien sind wichtig und aussagefähig, um beurteilen zu können, ob eine Lösungsidee oder eine andere Situation oder Konstruktion besser ist als die heutige?
4	Differenz zwischen dem Ist-Zustand und dem Ziel beschreiben	Was muss getan werden, um das Ziel zu erreichen? Was hindert die Akteur:innen, das Ziel anzustreben oder zu erreichen? Welche Funktionen muss unsere geeignete Lösung haben, um das Ziel zu erreichen? Wie sollen die Menschen eine geeignete Lösung nutzen?
5	Lösungsmöglichkeiten finden	Hier sollen, wenn möglich, alle relevanten Lösungsmöglichkeiten gefunden werden. Zumindest aber müssen relevante und grundverschiedene Möglichkeiten gefunden werden, um diese miteinander vergleichen zu können: Welche Ansätze können das Ziel erreichen? Welche Ansätze verändern die Situation in geeigneter Form? Welche Lösungen ermöglichen die benötigten Funktionen?
6	Bewerten der Lösungsmöglichkeiten anhand der Kriterien	Alle Lösungsmöglichkeiten werden mit den gleichen Kriterien und unvoreingenommen verglichen und bewertet: Welche Ziele werden durch welche Lösung erreicht? Was sind die Aufwände für die einzelnen Lösungsmöglichkeiten? Was sind die ungewollten Auswirkungen der einzelnen Lösungsmöglichkeiten? Welche Lösung bietet nach heutigem Erkenntnisstand die beste Möglichkeit das Ziel zu erreichen, ohne andere Werte zu gefährden?
7	Umsetzen	Die im vorherigen Schritt ausgewählte Lösungsmöglichkeit werden umgesetzt.
8	Bewerten der Umsetzung	Begleitend zu der Umsetzung ist die Veränderung zu bewerten: Ist die Lösung so, wie wir das geplant haben? Funktioniert sie geeignet? Sind ihre anderen Auswirkungen erträglich? Haben wir unerwünschte Auswirkungen, an die wir vorher nicht gedacht haben? Müssen wir die Lösung korrigieren oder nachbessern? Müssen wir abbrechen und neu beginnen?
9	Lernen	Welche Rückwirkungen haben die gemachten Erfahrungen für die Organisation oder die Gesellschaft? Sind die Methoden geeignet? Sollen wir sie verändern? Sind die grundlegenden Annahmen auch über die Ziele richtig?



Schlechte Entscheidungen treffen

Gerade boshafte Probleme verleiten in allen Lebensbereichen zu schlechten Entscheidungen. Dies hat mehrere Gründe, die letztendlich alle aus der benötigten Anstrengung resultieren:

- Es gibt keine richtige, eindeutige oder einfach zugängliche Lösung, sondern nur viele mehr oder weniger schlechte Wege, mit dem Problem umzugehen.
- Es wird schnell offenbar, dass es keine einfache Lösung gibt, sondern dass das Problem besonders viel Aufmerksamkeit oder Ressourcen benötigt.
- Niemand hat schon vorher die notwendigen Ressourcen, Erfahrungen, das Wissen und die Kompetenzen, um sich dem Problem in ausreichender Form zu stellen. Es besteht Lernzwang.
- Jede erste Analyse zeigt bereits, dass alle Lösungsvorschläge spezifische Nachteile aufweisen. Dabei können unterschiedliche Lösungsansätze nachteilig für jeweils andere Gruppen sein.
- Keine Lösung liefert auf Anhieb eine auch nur befriedigende Antwort auf die drängenderen Probleme; es wird notwendig werden, Nachteile gegeneinander aufzuwiegen.
- Nicht alle Folgen einer Entscheidung sind offensichtlich. Auch nicht nach einer gründlichen Analyse.
- Daher können sich schnell Bauchentscheidungen, Gruppenhysterien, Glaubenssätze, Scharlatan:innen oder Magier:innen durchsetzen, denn diese versprechen alle eine einfache Lösung ohne Anstrengung und ohne Abwägung von Interessen.

2.7 Entscheidungsräume

Die Beispiele und Aufgaben in diesem Buch sind gestaltet, als ob wir zu den jeweiligen Problemen eine Lösung erarbeiten dürften. Dies ist im richtigen Leben nicht immer der Fall. Im Alltag stellt sich diese Situation oft anders dar. Ingenieur:innen haben einen mehr oder weniger klar umrissenen Entscheidungsraum, innerhalb dessen sie gute Ergebnisse liefern sollen. Die Kunst ist an dieser Stelle, den eigenen Entscheidungsraum gut zu nutzen:

- Bekomme ich eine klar und vollständig definierte Aufgabe zugeordnet, so wird erwartet, dass ich den vorgegebenen Entscheidungsraum voll ausnutze: Alles andere ist ein Hinweis auf Entscheidungsschwäche, mangelnde Befähigung oder Angst. Vorgesetzte sehen dies sofort und damit kann ich mir jede Möglichkeit auf mehr Verantwortung, mehr Gehalt oder einen Aufstieg verbaut haben.
- Oft sind übertragene Aufgaben nicht klar definiert. In diesem Fall ist bereits das Festlegen des eigenen Entscheidungsraumes ein Teil der notwendigen Klärung der

Aufgabenstellung. Auf der einen Seite gibt es Rahmenbedingungen, die einzuhalten sind, oder bestimmte Entscheidungen, die von anderen getroffen werden müssen. Dies ist immer zu berücksichtigen. Auf der anderen Seite wird Mut zu einer großzügigen Auslegung des eigenen Entscheidungsraumes oft belohnt, da ich damit dokumentiere, dass ich das Ganze im Blick habe. Dabei kann es erforderlich sein, entweder flexibel auf Entscheidungen zu reagieren, die doch an anderer Stelle getroffen wurden, oder selbst Entscheidungsprozesse an anderem Ort anzustoßen.

- Manchmal kann es notwendig sein, auch zu Problemen der eigenen Organisation oder Lösungsansätzen von anderen Mitgliedern der Organisation eine Bewertung vorzunehmen, die nicht erfragt wurde. Dies ist schwieriges Terrain und muss mit der notwendigen Sensibilität und Flexibilität kommuniziert werden.
- „Frage nicht nach Erlaubnis, sondern bitte um Vergebung“ ist ein Motto, mit dem in einigen Situationen bewusst ein eigenes Risiko verbunden ist. Die Frage nach der Erlaubnis kann zu lange dauern oder die Antwort steht erst einmal fest und würde die eigene als notwendig angesehene Handlung unmöglich machen. Diese Herangehensweise ist, wenn sie mit dem notwendigen Augenmaß angewendet wird, eine Voraussetzung für eigenes proaktives und gestaltendes Handeln.

Als Bürger:innen, Interessenvertreter:innen, Journalist:innen, Berater:innen, Nichtregierungsorganisationen (Non Governmental Organization, NGO), aber auch als Mitarbeiter:innen eines Unternehmens kommen wir oft in die Situation, dass wir uns unseren Entscheidungsraum zum Nutzen der Gesellschaft oder der Organisation selber definieren müssen. Dann sind es die eigenen Werte, die eigene Kompetenz und das eigene Wissen sowie die eigene Motivation, die dies im Rahmen der Regeln der Gesellschaft oder Organisation festlegen.



Haltung beeinflusst Ergebnisse

In einer Organisation ist es wichtig, zu erkennen, welche Haltung grundsätzlich anschlussfähig ist, welche Haltung dominiert und welche Haltungen nicht erwünscht sind. Als Haltung ist hier ein grundlegender Satz an Werten, Erwartungen, Glaubenssätzen, aber auch Handlungsgrundlagen gemeint, die Entscheidungen beeinflussen, ohne dass sie jeweils ausgesprochen werden müssen.

Klassifikation der Haltungen

Die Haltung, mit der die Einhaltung planetarer Grenzen, die Transformation des Energiesystems oder konkreter der Umgang mit Treibhausgasen aus Sicht von Ingenieur:innen angegangen werden, lässt sich klassifizieren. Natürlich sind die Übergänge fließend und eine Organisation kann in unterschiedlichen Bereichen unterschiedliche Haltungen haben (Seager et al. 2012).

Business as usual Bei dieser Haltung steht Technik-Optimismus im Vordergrund: Ausgangspunkt des Denkens ist die Annahme, dass es immer eine technische Lösung geben wird oder dass andere das Problem aus der Welt schaffen. Konkreter kann Technik-Optimismus als eine Haltung verstanden werden, die die Kernfragen

dieses Buches bereits beantwortet sieht. Für Technik-Optimist:innen würde es immer genug Ressourcen geben, Energie würde erscheinen, wenn sie benötigt wird, Entrepreneur:innen würden zum richtigen Zeitpunkt und unbeleckt von (natur-)gesetzlichen Begrenzungen Lösungen liefern, unendliches Wachstum stellte kein Problem, sondern die Lösung dar. Komplexe und boshafte Probleme werden in dieser Weltsicht zumeist so weit reduziert und vereinfacht, bis sie sich als reine Aufgabe einer technischen Entwicklung darstellen, für die dann andere zuständig sind. Aus dieser Haltung heraus ist es oft schon schwierig, das Konzept des boshafte Problems zu verstehen. Damit ist hier kein Beitrag zur Lösung boshafter Probleme möglich (Morozov 2013; DeLay 2024).

Systemischer Ansatz Dies ist eine pragmatische Sicht, bei der boshafte Probleme als solche erkannt werden. Damit werden interdisziplinäre Ansätze für eine Lösungsfindung grundsätzlich zugelassen. Aus dieser Haltung heraus folgt dann eine Herangehensweise, bei der bisherige Ziele weiterverfolgt, diese aber zusätzlich innerhalb eines Nachhaltigkeitsrahmens (sustainability constraint) verwirklicht werden. Damit sind finanzielle Aspekte auch weiterhin die Treiber der Entwicklung, mit der Randbedingung, dass jetzt weitere regulatorische Anforderungen durch die gesuchte Lösung erfüllt werden sollen. Green Growth fällt in diese Kategorie.

Eine etwas weitergehende zweite Variante sind die Methoden im Rahmen einer Triple Bottom Line (als Drei-Säulen-Modell: profit, people, planet). In diesem Rahmen werden neben den rein finanziellen Treibern auch soziale Aspekte und Aspekte der Wechselwirkung mit der (natürlichen) Umwelt mit einbezogen. Dabei geht es hier im Kern um einen Aushandlungsprozess zwischen diesen drei Aspekten, der z. B. in Form einer Risikobetrachtung gestaltet werden kann. Das Ergebnis sind Produkte, die effizienter hergestellt oder genutzt werden oder weniger schlecht im Hinblick auf ihre Umweltauswirkung sind und die einzeln sehr wohl einen Beitrag zu Zielen einer nachhaltigen Entwicklung leisten, da sie weniger schädliche Umweltauswirkungen aufweisen. Skaleneffekte, die in der Betrachtung nicht berücksichtigt werden, können den Beitrag dann verringern oder sogar umkehren. Auch wenn Triple Bottom Line nicht genügen wird, um die großen Probleme einer nachhaltigen Entwicklung zu lösen (siehe Kapitel 8), so ist dies doch heute eine gängige und für Unternehmen attraktive Haltung, aus der heraus zumindest versucht wird, einen eigenen ernsthaften und relevanten Beitrag zu leisten.

Sustainable Engineering Science Dieser Ansatz ist durch eine grundlegende Skepsis gegenüber rein technischen Lösungen geprägt. Diese Skepsis bezieht sich insbesondere auf aufwendige, material- oder energieintensive Lösungsvorschläge. Transformation zu einer nachhaltigen Entwicklung ist grundsätzlich als boshafte Problem verstanden, für das es selten rein technische Lösungen geben kann. Im Zentrum der Beschäftigung mit boshafte Problemen stehen Rückwirkungen und Skaleneffekte. Die Methoden in diesem Buch helfen bei einem systemischen Ansatz und bei Sustainable Engineering Science.

Wo möchte ich tätig sein?

Ich kann mir die Organisation, in der ich tätig sein möchte, nach ihrer Haltung aussuchen. Der Versuch, in einer Organisation eine grundsätzlich andere Haltung zu implementieren, ist sehr schwierig, zeitaufwendig und scheitert oft. In einem Un-

ternehmen ist es die Aufgabe der obersten Führung, die Haltung der Organisation zu entwickeln und dann auch intern durchzusetzen (ISO 14001). Ich kann der Unternehmensführung bei diesem Ziel helfen. Ein Haltungswechsel lässt sich jedoch nicht gegen die Führung durchsetzen, ohne zumindest einen Wechsel dieser Führung zu erwägen.

Compliance Ein typisches und wichtiges Beispiel ist die Frage, wie eine Organisation mit gesetzlichen Anforderungen umgeht. Die Haltung dazu ist innerhalb der Organisation von allen verstanden, auch wenn diese Haltung nicht immer klar schriftlich formuliert wird oder die offizielle Verlautbarung dazu anders sein kann. Compliance meint das Einhalten der vorhandenen gesetzlichen Anforderungen. Für Organisationen ist Compliance in diesem Sinne mit erheblichem Aufwand verbunden, denn es muss regelmäßig der aktuelle Stand recherchiert werden. Dieser muss innerhalb der Organisation kommuniziert werden, bei Änderungen müssen Verfahren, Prozesse und Produkte angepasst und gegebenenfalls aufwendig umgeändert werden und die Einhaltung muss intern überprüft werden. Compliance gehört zu den wesentlichen Elementen des Umgangs mit Risiken einer Organisation. Compliance ist eigentlich Gesetzestreue und damit eine Selbstverständlichkeit, dies kann aber innerhalb einer Organisation anders gesehen und anders dargestellt werden. Dann ist es meine persönliche Entscheidung, ob ich Teil einer solchen Organisation sein möchte und bereit bin, die damit verbundenen persönlichen Risiken zu tragen.

2.8 Risiko

Der Umgang mit Risiken ist eine hohe Kunst. In vielen Lebensbereichen können Risiken relevant oder erheblich sein. Dabei stellen sich Risiken und damit die sinnvolle und die notwendige Herangehensweise für unterschiedliche Bereiche oder Sektoren unterschiedlich dar. Unternehmen müssen ihre geschäftlichen Risiken kennen und geeignete Strategien zum Umgang damit entwickeln. Versicherungen müssen zusätzlich die Risiken ihrer Kund:innen identifizieren, bewerten und quantifizieren. Staaten müssen im Rahmen der Daseinsvorsorge Risiken ihrer Bürger:innen erkennen und den geeigneten Umgang damit festlegen. In allen Fällen sind komplexe Abwägungen zwischen unterschiedlichen Informationen, Rechtsgütern und Ansprüchen notwendig.

Organisationen In der ISO 31000 wird die Methode der Risikobetrachtung für Risiken beschrieben, die eine Organisation betreffen. Es ist also die Sicht der Organisation nach außen und nach innen, die hier betrachtet wird. Diese Norm gibt eine gute Einführung in Methoden zum Umgang mit Risiken und der dort verwendete Risikobegriff ist hier relevant.



Begriff Risiko

Eine hilfreiche Definition für den Begriff Risiko laut nach ISO 31000 wie folgt:

„Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele

→ *Eine Auswirkung stellt eine Abweichung von Erwartungen dar – in positiver und/oder negativer Hinsicht*

→ *Die Ziele können verschiedene Aspekte umfassen (z. B. Finanzen, Gesundheit und Sicherheit sowie Umwelt) und auf verschiedenen Ebenen gelten (z. B. strategische, organisationsweite, projekt-, produkt- und prozessbezogene Ziele)*

→ *Risiken werden häufig durch Bezugnahme auf potenzielle Ereignisse und Auswirkungen oder eine Kombination davon charakterisiert. Risiken werden häufig mittels der Auswirkungen eines Ereignisses (einschließlich von Entwicklungen) in Verbindung mit der Wahrscheinlichkeit seines Eintretens beschrieben*

→ *Unsicherheit ist der Zustand, der sich aus dem gänzlichen oder teilweisen Fehlen von Informationen, Verständnis oder Wissen über ein Ereignis, seine Auswirkung oder seine Wahrscheinlichkeit ergibt“*

Eine andere Sicht auf den Begriff Risiko und Formen der Risikominderung bringt die Produktsicherheit, wie sie in der ISO 12100 grundlegend eingeführt wird, schon über die Definition. Hier ist ein Risiko die

„Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens und seines Schadensausmaßes.“

Diese Norm bezieht sich ganz konkret auf das Inverkehrbringen von Produkten, für die innerhalb der EU die jeweiligen CE-Richtlinien anzuwenden sind. Dabei ist die grundlegende Methode zur Risikominderung für Produkte in der ISO 12100 dargestellt. Hierbei geht es um konkrete physische Risiken für Personen und gegebenenfalls für Haustiere, die von Produkten direkt ausgehen. Langfristige, systemische, psychische oder allgemein gesellschaftliche Risiken sind explizit nicht abgedeckt.

Management Ziel des Risikomanagements ist es, ein geordnetes und systematisches Verfahren für den Umgang mit Risiken zu entwickeln und dieses dann konsequent anzuwenden. Die daraus resultierende Risikobetrachtung und letztendlich Risikominderung hat dabei das Ziel, alle relevanten Risiken zu identifizieren und Maßnahmen festzulegen, wie eine mögliche Auswirkung, insbesondere ein möglicher Schaden, auf ein zulässiges Maß beschränkt werden kann.

Eine Risikobetrachtung ist zumindest im europäischen Rechtssystem, in dem das Vorsorgeprinzip gilt, grundsätzlich notwendig, bevor eine Maßnahme ergriffen wird, die Risiken enthalten kann. Als wichtige Anforderung an ein Risikomanagement und damit an die Risikobetrachtung formuliert die ISO 31000:

- Das Ziel ist es, in allen Lebensbereichen Werte zu schützen oder zu schaffen. Genannt werden insbesondere menschliche Gesundheit und Sicherheit, Einhaltung von gesetzlichen und regulatorischen Vorschriften (compliance), öffentliche Akzeptanz von Maßnahmen oder Produkten, Schutz der Umwelt vor Umweltauswirkungen, Sicherstellen einer Produktqualität, Aspekte des Projektmanagements und gute Führung (governance).
- Risikomanagement soll Bestandteil aller Entscheidungsprozesse und Teil der Entscheidungsfindung sein.
- Risikomanagement befasst sich ausdrücklich mit der Unsicherheit, d. h., Unsicherheit darf kein Grund sein, einen Aspekt zu vernachlässigen, sondern es ist erst einmal ein Kennzeichen eines relevanten Aspekts.
- Die Methode ist systematisch, strukturiert und zeitgerecht, d. h. wissenschaftlich. Sie beruht auf den aktuell verfügbaren Informationen. Sie verwendet, wo es möglich ist, geordnete Verfahren. Der Zweck der Norm ist es damit, Naivität, Glaube, Denkfaulheit, eingefahrene Denkmuster, überbordenden Optimismus und weitere Hinderungsgründe für eine evidenzbasierte Auseinandersetzung mit den eigenen Zielen und Unsicherheiten effektiv zu verhindern.
- Jede Organisation muss ihre eigenen Verfahren und Strukturen finden, die ihr Risikoportfolio geeignet abdeckt.

Zeitrahmen Eine schwierige Frage ist grundsätzlich der Zeitrahmen, über den Risiken betrachtet werden. Hier sind eventuelle rechtliche Vorgaben nur ein Aspekt. Gerade für Regierungen ist ein sehr langer Planungsrahmen notwendig. Für langfristig angelegte Unternehmen im Bereich der Extraktion von Rohstoffen oder auch der Grundstoffindustrie sind Planungsrahmen von 30 Jahren eher üblich. Oft wird eine Cost-Benefit-Perspektive verwendet (siehe Kapitel 6). Diese nutzt implizit einen Zeitrahmen, beantwortet jedoch die zugrunde liegende Frage nicht, sondern verlagert sie.

Methoden Die allgemeine Methode für den Umgang mit Risiken besteht aus den in Tabelle 2.4 angegebenen Schritten. Unabhängig davon sind für das Festlegen der Kriterien für die Bewertung von Risiken die folgenden Überlegungen relevant:

- Sind die Ursachen der Veränderung einmalig oder langfristig, unerwartet oder systemisch?
- Was sind die möglichen Auswirkungen von Abweichungen auf die Organisation oder Gesellschaft? Was ist ihre Dauer und Intensität?
- Gibt es Möglichkeiten, die Ursachen und ihre Auswirkungen zu messen oder anderweitig zu quantifizieren?