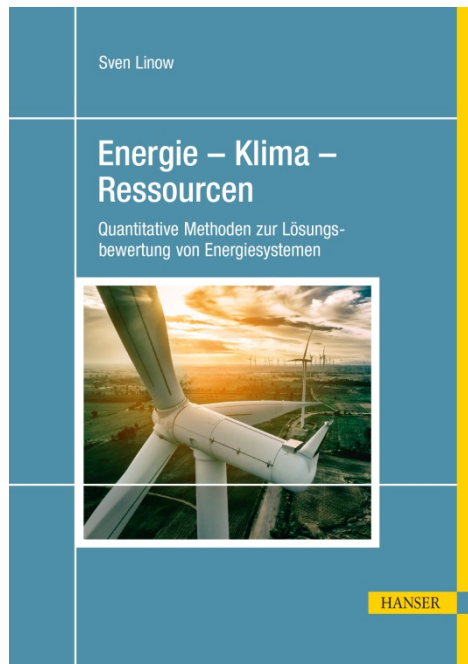


# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Energie – Klima – Ressourcen“

von Sven Linow

Print-ISBN: 978-3-446-46270-0  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46278-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46270-0>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

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

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

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

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

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

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

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



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

# Vorwort

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

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

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

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

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

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

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

Darmstadt, September 2019

# 7

## Energiewende und nachhaltige Entwicklung – die Aufgabe

### ■ 7.1 Die Energiewende

Die günstige Bereitstellung von ausreichend Energie zu jeder Zeit und an jedem Ort ist die zentrale Grundlage unserer heutigen Gesellschaftsstruktur, alles Weitere folgt daraus (Fizaine 2016, Friedemann 2016, Perkins 2017, Smil 2017). Alle anderen, insbesondere wirtschaftlichen Aspekte hängen an dieser Voraussetzung (Hall 2018). Aus diesem Grunde ist die Bewertung von technischen Konzepten und Lösungen, die eine langfristige Bereitstellung von ausreichender und günstiger Energie sicherstellen sollen, von großer Bedeutung. Dieser Abschnitt stellt wesentliche Konzepte dar und blickt auf die Frage, was ausreichend und günstig sein kann.

Für das Verstehen ist in diesem Zusammenhang die energetische Geschichte hilfreich, also die Entwicklung der technischen Bereitstellung von Energie und ihre Rückwirkung auf menschliche Gesellschaften. Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über relevante Schritte. Bemerkenswert ist, dass die dritte und vierte industrielle Revolution jeweils keine Technik darstellt, die Energie selber bereitstellt oder dies energetisch günstiger tut. Die letzte Zeile in der Tabelle 7.1 versteht sich als Ausblick auf solche Techniken, die eine weitere Bereitstellung von günstiger Energie ermöglichen, wenn die Bereitstellung fossiler Energieträger nicht mehr energetisch günstig, gesellschaftlich gewollt oder finanziell tragbar ist. Dies kann man so ähnlich verstehen wie das Konzept der „*backstop-Technology*“ nach Solow: Backstops sind solche Alternativen, die angewendet werden, wenn die heutigen (fossilen) Technologien im Verhältnis zu teuer werden.

**Tabelle 7.1** Wesentliche technische Entwicklungsschritte oder Innovationen bei der Bereitstellung günstigerer Energie und ihr energetischer Nutzen für menschliche Gesellschaften

Schritt	Industrielle Revolution	Zeitpunkt	Technik	Energetischer Nutzen
1	–	Vor ca. 2 Millionen Jahren	Feuer	Bessere Nutzung der Nahrung, geringerer Aufwand für Verdauung, Möglichkeit für größere Hirnleistung: soziale Entwicklungen, Sprache, Jagdverhalten
2	–	Vor mehr als 400 000 Jahren	Jagd Waffen	Neues Jagdwild, bessere Versorgung mit Nahrung und anderen Ressourcen: soziale Entwicklungen, Sprache, Jagdverhalten
3	–	Vor weit mehr als 50 000 Jahren	Nähen: Kleidung, Zelte, Boote	Ausweitung des Lebensraumes in alle Klimazonen: Neues Jagdwild ermöglicht neue Kulturen
4	–	Vor ca. 10 000 Jahren	Landwirtschaft	Bessere und regelmäßige Ausnutzung von Böden: ermöglicht höhere Bevölkerungsdichte
5	–	Vor ca. 8000 Jahren	Viehzucht: Rind und Schaf	Nutzen marginaler Flächen (Steppe, Gebirge) für die Erzeugung von Nahrung
6	–	Vor ca. 6500 Jahren	Pferd und Rad	Transport, Maschinen, schnelle Kriegsführung
7	–	Vor ca. 4000 Jahren	Wasserräder	Maschinen, Bewässerung für die Landwirtschaft, Getreide mahlen
8	–	Vor ca. 2000 Jahren	Windräder	Maschinen, Getreide mahlen, Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen, Entwässerung von Sumpfland
9	Erste	1850	Kohle und Dampfmaschine	Maschinen, Transport und Eisenbahn, Bergbau, Stahl, Kunstdünger, Kälte
10	Zweite	1920	Elektrifizierung	Maschinen, Transport, Licht, Elektrowärme, Vakuum
–	Dritte	1980	Computer	Ein möglicher indirekter energetischer Nutzen soll sich aus der damit möglichen besseren Berechenbarkeit und Vorhersage ergeben
–	Vierte	2020	Digitalisierung	Ein möglicher indirekter energetischer Nutzen soll sich aus der damit möglichen besseren Berechenbarkeit und Vorhersage ergeben
11	–	Jetzt, später oder nie!?	Ersatz für fossile Energieträger	Erhalt der Möglichkeit günstiger Energie

Die Bundesregierung definiert im Sommer 2019 das Ziel der Energiewende folgendermaßen:

*„Das Ziel der Energiewende ist es, das Zeitalter der erneuerbaren Energien so schnell wie möglich zu erreichen. Und gleichzeitig den Preis für Strom bezahlbar zu halten.“*

(<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energiewende-im-ueberblick-229564>)

Die Zieldefinition der Bundesregierung ist eine eher ungenaue Aussage. Als Ingenieurin oder Ingenieur genügt einem dies sicher nicht, um damit zu arbeiten, denn es sind keine messbaren oder quantifizierbaren Kriterien benannt, mit denen Lösungen ausgewählt und bewertet werden können:

- Was genau ist das „*Zeitalter der erneuerbaren Energien*“? Das wird an keiner weiteren Stelle der Quelle klar formuliert, wäre aber notwendig: Auch eine Gesellschaft auf Steinzeitniveau könnte so charakterisiert werden.
- Wann ist „*so schnell, wie möglich*“? Es gibt sehr unterschiedliche Möglichkeiten einer Umstellung – die Aussage „*innerhalb von 12 Monaten ist die Transformation abgeschlossen*“ erfordert grundlegend andere Lösungsansätze als: „*wir starten erst nach dem Ende meiner Amtszeit*“.
- Was ist eine konkrete Zahl, wann ist „*Strom bezahlbar*“? Hier wäre eine konkrete Angabe in inflationsbereinigten € je kWh notwendig, um Lösungsansätze bewerten zu können.

Auch das Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG) in seiner aktuellen Form formuliert diese Ziele in einer ähnlich allgemeinen und letztendlich nicht bindenden Form.

Die Energiewende, wie sie seitens der Bundesregierung vorangetrieben wird, setzt sich aus mehreren Elementen zusammen, die mit unterschiedlicher Intensität bearbeitet werden:

1. Die Steigerung der Energieeffizienz in allen technischen Bereichen und Segmenten.
2. Eine Umstellung auf elektrische Antriebe bzw. Elektrizität als wesentliche Grundform der Energie.
3. Eine Wärmewende, also die Umstellung auf nicht fossile Heizung im Gebäudebereich.
4. Eine Verkehrswende, also die Umstellung des Verkehrs und des Warentransportes auf andere, vorrangig elektrische Antriebssysteme.
5. Die Umstellung der Energieversorgung für industrielle Prozesse auf Elektrizität.

Um überhaupt über Lösungsansätze nachdenken zu können, benötigen wir messbare Zielvorgaben (Abschnitt 7.11). Die Energiewende ist ein boshafes Problem, damit ist die Zieldefinition bereits Teil des Lösungsprozesses. Dieses Kapitel nähert

sich einer Zieldefinition aus gesellschaftlicher Sicht, fokussiert dabei aber auf den technischen Aspekt der Bereitstellung von ausreichender Energie.



### Wie lange reichen die fossilen Energieträger (und wollen wir sie alle verbrennen)?

Es gibt viele Abschätzungen und Projektionen dafür, welche Masse an fossilen Energieträgern im System Erde vorhanden ist und ausreichend kostengünstig extrahiert werden kann. Die Spanne reicht von tiefem Pessimismus bis hin zu überschäumendem Optimismus. Legt man die belastbaren Daten aus (McGlade 2015) zugrunde, so finden sich:

- Für Kohle und Braunkohle zusammen 77 ZJ an chemischer Energie, davon etwa 17 ZJ Braunkohle und 60 ZJ Steinkohle.
- Für Erdöl  $7,10 \cdot 10^{12}$  Barrel (bbl).
- Für Erdgas  $680 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ .

#### Reichweite der Reserven

F: Welcher Masse und welchem Volumen an Steinkohle und an Braunkohle entsprechen diese Werte? Wie hoch kann man Darmstadt mit der Kohle bedecken?

Steinkohle hat etwa eine Dichte von  $800 \text{ kg m}^{-3}$  und einen Heizwert von  $25 \text{ MJ kg}^{-1}$ . In guter Näherung kann man annehmen, dass Steinkohle ausschließlich aus Kohlenstoff und Braunkohle zu 50% aus Kohlenstoff besteht (Massenanteil). Braunkohle hat etwa eine Dichte von  $1000 \text{ kg m}^{-3}$  und einen Heizwert von  $9 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Darmstadt mit seinen 160 000 Einwohnern erstreckt sich auf einer Fläche von  $112 \text{ km}^2$ .

A: Aus dem Heizwert der Brennstoffe bestimmt man mit

$$m = \frac{Q}{H_i}$$

für Braunkohle  $1,89 \cdot 10^{15} \text{ kg}$  und für Steinkohle  $2,40 \cdot 10^{15} \text{ kg}$ . Damit ist das Volumen aus

$$V = \frac{m}{\rho}$$

für Braunkohle  $1,89 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$  oder  $1890 \text{ km}^3$  und für Steinkohle  $3,00 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$  oder  $3000 \text{ km}^3$ . Stapelt man diese Massen auf der Fläche von Darmstadt, so beträgt die Höhe für Braunkohle  $16,87 \text{ km}$  und für Steinkohle  $26,79 \text{ km}$ .

F: Was sind die statischen Reichweiten (Kapitel 4) von Kohle, Erdgas und Erdöl unter den folgenden Annahmen?

- Der gesamte Weltenergiebedarf heute beträgt 600 EJ.
- Je 30% werden aus diesen drei Primärenergieträgern gedeckt.

A: Die statischen Reichweiten folgen aus dem jeweiligen jährlichen Verbrauch von jeweils 180 EJ zu

- Kohle etwa 427 Jahre,
- Erdöl etwa 241 Jahre und
- Erdgas etwa 135 Jahre.

F: Was sind die dynamischen Reichweiten (Kapitel 4) der drei Energieträger unter der Annahme, dass der Weltenergiebedarf weiter mit 2 % pro Jahr anwächst?

A: Für kleine Wachstumsraten ist der Zeitraum  $\tau$ , innerhalb dessen ein Vorrat  $y(\tau)$  verbraucht wird:

$$\tau = \frac{1}{z} \cdot \ln \left( \frac{y(\tau)}{x(t_0)} \cdot z + 1 \right).$$

Hier ist die Wachstumsrate  $z = 0,02$  und  $x(t_0) = 180$  EJ der heutige Verbrauch für jeden der drei Energieträger. Damit ergibt sich

- für Kohle etwa 92 Jahre,
- für Erdöl etwa 74 Jahre und
- für Erdgas etwa 56 Jahre.

Diese Zeiträume sind signifikant kürzer als die statischen Reichweiten. Für eine detailliertere Bewertung der Zahlen ist die Zeit relevant, die für den Ersatz eines Energiesystems durch ein anderes benötigt wird (Kapitel 14).

### Kohlendioxid-Emissionen

F: Was ist das Volumen des Kohlendioxids bei Normbedingung, das bei vollständiger Verbrennung der Kohle frei wird?

A: Die Masse der Steinkohle ist reiner Kohlenstoff, 50 % der Masse der Braunkohle ist Kohlenstoff und damit in Summe  $m_{C,K} = 3,34 \cdot 10^{15}$  kg. Damit folgt

$$n_{C,K} = \frac{m_{C,K}}{M_C} = 0,2787 \cdot 10^{15} \text{ kmol}.$$

Unter der Annahme des idealen Gases folgt das Volumen des  $\text{CO}_2$  bei Normbedingung zu

$$V_{N,\text{CO}_2,K} = \frac{n_{C,K} \cdot R \cdot T_N}{p_N} = 6,247 \cdot 10^{15} \text{ m}_N^3.$$

F: Was ist das Volumen des Kohlendioxids bei Normbedingung, das bei vollständiger Verbrennung des Erdöls frei wird? Erdöl hat eine mittlere Dichte von  $800 \text{ kg m}^{-3}$ , der Massenanteil des Kohlenstoffs beträgt heute im Mittel 85 % und ein Barrel entspricht  $0,1591 \text{ m}^3$ .



A: Damit ist die Masse an Kohlendioxid aus Erdöl

$$m_{\text{CO}_2, \dot{O}l} = m_{\text{C}, \dot{O}l} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{C}}} = V_{\dot{O}l} \cdot \rho_{\dot{O}l} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{C}}} = 0,768 \cdot 10^{15} \text{ kg},$$

daraus folgt

$$V_{N, \text{CO}_2, \dot{O}l} = \frac{m_{\text{CO}_2, \dot{O}l} \cdot R_{\text{CO}_2} \cdot T_N}{\rho_N} = 1,43 \cdot 10^{15} \text{ m}_N^3.$$

F: Was ist das Normvolumen des Kohlendioxids, das bei vollständiger Verbrennung des Erdgases frei wird?

- A: Unter der vereinfachenden Annahme, dass Erdgas nur aus Methan besteht, ist das Volumen an  $\text{CO}_2$  gleich dem Volumen an  $\text{CH}_4$  oder  $680 \cdot 10^{12} \text{ m}_N^3$ .

### Umweltauswirkung

F: Welche Konzentration erreicht das atmosphärische  $\text{CO}_2$  insgesamt, wenn das gesamte  $\text{CO}_2$  aus der Verbrennung dieser Massen an fossilen Energieträgern in die Atmosphäre gegeben wird, und welche Änderung der mittleren Temperatur der Erdatmosphäre würde dies ergeben?

A: Das gesamte Volumen an  $\text{CO}_2$  beträgt

$$V_{N, \text{CO}_2} = V_{N, \text{CO}_2, K} + V_{N, \text{CO}_2, \dot{O}l} + V_{N, \text{CO}_2, \text{Gas}} = 8,36 \cdot 10^{15} \text{ m}_N^3.$$

Die Konzentration an  $\text{CO}_2$  beträgt im Jahr 2018  $r(2018) = 415 \text{ ppm}$ . Mit dem Normvolumen der Atmosphäre aus Kapitel 8 von  $3,986 \cdot 10^{18} \text{ m}_N^3$  beträgt die maximal mögliche Konzentration dann

$$r_{\text{CO}_2} = r(2018) + \frac{V_{N, \text{CO}_2}}{V_{N, \text{Atm}}} = 2500 \text{ ppm}.$$

Daraus folgt ein Strahlungstreiber (*radiative forcing*, Kapitel 8) von

$$\Delta F = 5,35 \text{ W m}^{-2} \cdot \ln \frac{2500 \text{ ppm}}{280 \text{ ppm}} = 11,7 \text{ W m}^{-2}.$$

Dieses würde zu einer Änderung der mittleren Temperatur der Erdatmosphäre um

$$\Delta T = \lambda \cdot \Delta F = 0,8 \text{ K W}^{-1} \text{ m}^2 = 9,4 \text{ K}$$

gegenüber dem Bezugsjahr 1750 führen. Dies ist eine Temperaturerhöhung, die niemand haben möchte, der sie erleben kann, da dies wohl das Ende der Menschheit als Spezies bedeutet (Wallace-Wells 2019). Die gesamte Masse an wirtschaftlich zugänglichen fossilen Brennstoffen kann nur dann genutzt werden, wenn die damit verbundene Emission an  $\text{CO}_2$  verhindert wird (Kapitel 13).

## ■ 7.2 Technische Herausforderungen

Die Umstellung der Energieversorgung von heute leicht verfügbaren fossilen Energieträgern auf die Nutzung nachhaltiger oder regenerativer Quellen, d. h. auf Energieströme des Systems Erde, stellt neue Anforderungen an die Versorgung und die Nutzung. Diese Anforderungen waren vor dem Beginn der ersten industriellen Revolution bekannt und verstanden gewesen, sie waren fester Bestandteil der Organisation der Gesellschaft und des Lebens. Durch den verbreiteten und günstigen Einsatz von hochwertigen Brennstoffen und Elektrizität hat sich aus einer angebotsorientierten Nutzung aktuell verfügbarer Energie die heutige bedarfsorientierte Bereitstellung hochwertiger Energie entwickelt. Dieser heutige Zustand soll wenn möglich beibehalten werden – zumindest ist dies implizit in den meisten Planungen oder Szenarien zur Zukunft der Energieversorgung so enthalten. Damit ergeben sich einige spezielle Probleme, die zu berücksichtigen und zu lösen sind.

### **Energiedichte und Konzentration**

Fossile Energieträger erlauben eine sehr hohe Konzentration an Leistung an einem Ort. Es werden wenige, große Kraftwerke benötigt, um viel Elektrizität bereitzustellen. Tanks oder Bunker können verhältnismäßig klein sein und erlauben damit ozeangehende Schiffe für interkontinentale Lieferketten oder Flugzeuge für Langstrecken.

Die Leistungsdichte in den Energieströmen der Erde ist begrenzt und zumeist recht gering (Kapitel 8). Dadurch müssen regenerative Energieformen über große Flächen und mit großen Anlagen geerntet werden. Aus einer zentralen und entweder in alten Industriestandorten oder an entlegenen Orten versteckten Infrastruktur muss eine über das Land verteilte und überall sichtbare entkonzentrierte Technik werden. Dies führt zu erheblichen Akzeptanzproblemen.

### **Fluktuierende Erzeugung**

Viele Energieströme des Systems Erde, die für die Bereitstellung von Elektrizität genutzt werden, fluktuieren stark:

- Der Tagesgang der Sonne entscheidet, wie viel solare Einstrahlung maximal bereitstehen kann.
- Jahreszeitliche Schwankungen an Sonnenstrahlung sind zumeist erheblich.
- Wolken werfen Schatten, Niederschlag und Wind variieren mit dem Wetter.
- Größere Wettereinflüsse, wie Trockenperioden, Stürme, Flauten, Inversionswetterlage, Böen, Gewitter usw. wirken sich auf die erzeugbare Energie aus.

Damit variiert die Leistung, die an einem Ort geerntet werden kann. Dies führt insgesamt zu Nutzungsgraden, die für jeden der Energieströme (Sonne, Wind,

Wasser) lokal, aber auch zeitlich (von Jahr zu Jahr) variieren. Alle Nutzungsgrade sind jedoch deutlich geringer als bei fossil befeuerter Technik.

Diese Fluktuationen können großräumig über ein ausreichend leistungsstarkes Netz geglättet werden, sie stellen jedoch zusätzliche Anforderungen an die Erzeugung, die Nutzung und an das benötigte Zwischenspeichern (Kapitel 12). Die reine Nutzung regenerativer Energiequellen ist damit für eine Gesellschaft mit zusätzlichen Anforderungen verbunden, insbesondere wenn eine bedarfsgerechte Versorgung angestrebt bleibt.

### **Ort der Erzeugung**

Viele erneuerbare Energien können nicht überall gut geerntet werden, es gibt bevorzugte Standorte, an denen besonders hohe Erträge möglich werden:

- Die solare Einstrahlung variiert deutlich mit der Entfernung vom Äquator und dem Wetter. Zusätzlich hängt die Effizienz der Photovoltaik und der Solarthermie von der Umgebungstemperatur ab.
- Der Wind weht vorrangig über dem Meer oder über Bergkämme.
- Nutzbare Meeresströmungen oder Tiden liegen nur an wenigen Gunststandorten vor.

Damit sind Erzeugung und Verbrauch oft räumlich weit entfernt voneinander getrennt. Während fossile Primärenergieträger bisher recht einfach transportiert werden konnten, muss nun die Nutzenergie Elektrizität selber über z.T. sehr weite Strecken transportiert werden, um den Bedarf dort zu decken, wo er heute besteht. Auch die Alternative, dass wichtige Verbraucher in Regionen hoher Versorgungssicherheit umziehen, ist denkbar, aber mit technischem und gesellschaftlichem Aufwand verbunden.

### **Speicherung**

Fossile Energieträger lassen sich ausgesprochen gut speichern:

- Sie können bedarfsgerecht gefördert werden.
- Der Transportsektor stellt einen Speicher dar.
- Sie können gut gelagert werden:
  - Kohle kann über Jahre nahezu verlustfrei gelagert werden, wenn sie nicht entzündet wird.
  - Erdöl kann gut und lange in Tanks gelagert werden. Erdölprodukte selber können teilweise nur einige Monate oder wenige Jahre gelagert werden, da sie sich verändern (Benzin, Kerosin).
  - Erdgas kann im Pipeline-System über Druckvariation gespeichert werden, Es kann zudem unterirdisch in Kavernen gelagert werden.

- Bei geeigneter Einpassung der Lager in die Transport- und Aufbereitungskette können fossile Energieträger mit ausgesprochen geringem Aufwand und Verlusten so gelagert werden, dass jahreszeitliche Schwankungen im Bedarf problemlos aufgefangen werden; dies ist der Stand heute.

Elektrische Energie kann nur aufwändiger und mit Verlusten zwischengespeichert werden. Gängige heutige Methoden sind:

- Pumpspeicherkraftwerke für größere Mengen und
- Batterien lokal und für kleine Mengen.

Diskutiert werden bzw. in Entwicklung sind:

- extrem kurzfristige Speichermethoden, wie Kondensatoren oder Kreisel;
- Power to Gas – also die Umwandlung von Elektrizität in ein Gas, wie Wasserstoff oder Methan: Das Gas kann dann entweder für die Erzeugung von Wärme oder die Umwandlung der Wärme in Elektrizität verwendet werden;
- Power to X – also die Umwandlung von Elektrizität in eine beliebige Energieform, die gut gespeichert werden kann, einschließlich thermischer Energie.
- Heutige Druckluftspeicher sind nur bedingt als Speicher anzusehen, eigentlich speichern sie keine Energie, denn es fehlt die hierfür notwendige Speicherung der Wärme.

### **Bedarf vs. Erzeugung**

Eine bedarfsgerechte Erzeugung ist mit vielen erneuerbaren Energietechnologien nur begrenzt möglich und Zwischenspeichern ist mit erheblichem Aufwand und relevanten Verlusten verbunden (Kapitel 12). Damit ist die bedarfsgerechte Bereitstellung der Elektrizität eine Herausforderung: Eine mögliche Lösung wäre ein Paradigmenwechsel hin zu einer angebotsorientierten Nutzung, d. h., Elektrizität wird genutzt, wenn sie erzeugt werden kann. Häufig werden jedoch Ansätze diskutiert, die das bisherige Modell, bei dem Elektrizität nach Bedarf erzeugt wird, weiter erhalten sollen.

Inwieweit dies gelingen kann, hängt an gesellschaftlicher Akzeptanz, an der Existenz von technischen Lösungen, dem gesellschaftlich ertragbaren Preis für Elektrizität und an den für die technischen Lösungen benötigten Ressourcen. Der grundlegende Umbau einer Energieversorgung, so wie wir ihn jetzt als Energiewende erleben, dauert viele Jahre. Er kann nicht erst begonnen werden, wenn die alte Infrastruktur ihre Funktion beendet hat (Kapitel 14, Smil 2017). Handlungsoptionen sind:

- Ausbau des Versorgungsnetzes, um verfügbare Leistung über größere Flächen verteilen zu können und so insgesamt die Versorgungssicherheit zu verbessern.
- Umzug von industriellen Verbrauchern in die Nähe sicherer Erzeugung.

- Umbau der Nutzung, so dass der Verbrauch mit der Erzeugung variieren kann – also von bedarfsgerecht zu erzeugungsgerecht.
- Keine Energiewende, und damit Ende der Zivilisation mit dem Erschöpfen der fossilen Ressourcen oder durch extremen Klimawandel.



### Netzausbau in Deutschland

Bei Vollausbau der heute geplanten Kapazität an Windkraft stehen in der Deutschen Bucht zukünftig einmal 120 GW Nennleistung zur Verfügung. Die Kernfrage dieses Beispiels ist, wie dieser Offshore-Windstrom nach Süden transportiert werden kann, wo heute der größere Bedarf besteht?

Freileitungen mit einer Spannung von 380 kV bilden den Kern des europäischen Stromnetzes. Mit diesen Leitungen werden hohe Leistungen über weite Strecken transportiert: Typisch hat jedes Kabel dieser Leitungen einen Stahlkern von 40 mm<sup>2</sup> und eine Aluminium-Ummantelung (in dem der wesentliche Anteil des Stromes fließt), von 240 mm<sup>2</sup>. Unter üblichen Witterungsbedingungen kann ein solches Kabel etwa 1000 A tragen. Die typische 380-kV-Leitung südlich von Frankfurt hat in vier Ebenen zusammen 18 Bündel, wobei sich jedes Bündel aus vier solcher Leitungen zusammensetzt.

Hauptleitungen für Erdgas weisen einen Druck von etwa 80 bar auf und das Gas fließt mit einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 10 m s<sup>-1</sup>. Die großen Versorgungsleitungen haben einen typischen Innendurchmesser von 1000 mm. Sie liegen im Erdboden und haben daher eine konstante Temperatur von 10 °C.

F: Welche elektrische Leistung kann ein einzelnes Freileitungskabel transportieren? Wie viele Freileitungskabel benötigt man, um 120 GW elektrische Leistung zu transportieren, und wie viele Freileitungen benötigt man, um 120 GW zu transportieren?

A: Ein Kabel kann maximal

$$P_{el,Leitung} = U_{Leitung} \cdot I_{Leitung} = 380 \text{ MW}$$

übertragen, damit benötigt man 316 Kabel oder 5 vollständige Freileitungen von Nord nach Süd.

F: Welche Gasmenge (in Normkubikmetern je Sekunde) kann eine Erdgas-hauptleitung maximal transportieren? Welche Leistung (als potentielle Verbrennungswärme bezogen auf den unteren Heizwert) kann maximal durch eine Erdgashauptleitung transportiert werden?

A: Der Volumenstrom an Erdgas beträgt in einer Pipeline

$$\dot{V}_{Leitung} = A \cdot c = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot c = 7,854 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1},$$

bei 80 bar und 12 °C und damit bei Normbedingungen

$$\dot{V}_{N,Leitung} = \dot{V}_{Leitung} \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{\rho}{\rho_N} = 594,0 \text{ m}_N^3 \text{ s}^{-1}.$$

Dies entspricht einer Übertragungsleistung von

$$\dot{Q}_{Leitung} = \dot{V}_{N,Leitung} \cdot H_{u,Erdgas} = 21\,384 \text{ MW}.$$

F: Welcher Anteil der 120 GW Windstrom steht maximal als synthetisches elektrolytisches Erdgas zur Verfügung? Wie viele Erdgashauptleitungen werden benötigt, um die Leistung aus der vorigen Aufgabe in den Süden zu transportieren (Power to Gas in Kapitel 12)?

A: Der Gasstrom angegeben als potentieller Wärmestrom der Verbrennung des Gases beträgt

$$P_{PtoG} = \eta_{PtoG} \cdot P_{Wind} = 76,8 \text{ GW}.$$

Für den Transport werden

$$n_{Gas-Lei} = \frac{\dot{Q}_{Leitung}}{\dot{Q}_{Windstrom}} = 3,59,$$

also vier Erdgaspipelines der angegebenen Abmessung benötigt.

F: Welche Leistung steht im Süden am Ende der Gasleitungen zur Verfügung (i) für Wärme und (ii) für elektrische Leistung?

A: Als Wärmestrom stehen die bereits ermittelten  $\dot{Q}_{ProG} = 76,8 \text{ GW}$  zur Verfügung.

Für die Rückverstromung, also die Umwandlung des synthetischen Gases in elektrische Leistung, muss entweder der Wirkungsgrad aus Kapitel 12 für die gesamte Umwandlung von max. 38% verwendet werden,

$$P_{PtoGtoP} = \eta_{PtoGtoP} \cdot P_{Wind} = 45,6 \text{ GW},$$

oder man nimmt z. B. ein modernes GuD-Kraftwerk mit 60% und berechnet

$$P_{PtoGtoP} = \eta_{PtoG} \cdot \eta_{GuD} \cdot P_{Wind} = 46,1 \text{ GW}.$$

F: Welche Energiemenge ist in einer Gaspipeline mit einer Länge von 600 km gespeichert und welche in einer elektrischen Fernleitung?

A: Das Volumen der Pipeline beträgt

$$V_{Leitung} = A \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot l = 471\,238 \text{ m}^3$$

und daraus folgt das maximal enthaltene Gasvolumen bei Normbedingung von

$$V_{N,Leitung} = V_{Leitung} \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{p}{p_N} = 35\,640\,380 \text{ m}_N^3.$$

Damit ist die gespeicherte chemische Energie

$$Q_{Leitung} = V_{N,Leitung} \cdot H_{u,Erögas} = 1283 \text{ TJ}.$$

In der elektrischen Leitung ist keine Energie gespeichert.

F: Wie ändert sich der EROI der aus Windkraft erzeugten elektrischen Leistung durch den zwischengeschalteten Transport als synthetisches Erdgas und anschließende Wiederverstromung (der EROI der Nordsee-Windkraft beträgt etwa 15 mit der Systemgrenze Anschluss an das Stromnetz am Festland)?

A: Der EROI des Systems ergibt sich unter Vernachlässigung der energetischen Kosten der Gasinfrastruktur zu 5,7, da sich entsprechend die bereitgestellte Energie auf 38% reduziert hat.

Diese Aufgabe stellt zwei diskutierte Varianten gegenüber und zeigt die Vorteile beider Möglichkeiten auf. Der direkte Transport der Elektrizität erzeugt geringere Verluste als der Transport als Erdgas. Allerdings sind hier die Leistungsverluste der Elektrizität nicht berücksichtigt worden. Auf der anderen Seite hat der Transport als Gas den Vorteil, Schwankungen und Fluktuationen mit der Pipeline als Speicher auszugleichen.

## ■ 7.3 Bewertung zukünftiger Möglichkeiten

Eine Bewertung der Eignung einzelner technischer Lösungen im Hinblick auf eine Energiewende muss eine Vielzahl von ihren Eigenschaften berücksichtigen. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick, wie einzelne Möglichkeiten oder mehrere unterschiedliche Ansätze systematisch bewertet werden können: Ziel solcher Bewertungen ist es, eine Orientierung zu erhalten, welche Methode für einen speziellen Zweck, eine Region oder eine konkrete Anwendung die richtige ist.

Eine sinnvolle, einfache und recht vollständige Liste von Anforderungen an mögliche zukünftige Technologien für die Bereitstellung von Energie ist in der Tabelle 7.2 wiedergegeben. Diese Bewertungsmatrix ist eine Weiterentwicklung aus einem Blog, der ähnliche Themen adressiert wie dieses Buch (<https://dothemath.ucsd.edu/>). Die Liste nutzt dabei eine einfache Klassifizierung nach dem Ampelschema. Soll eine Technik zukünftig eine große Rolle spielen, so muss sie in allen

Aspekten gut abschneiden. Oft legt die niedrigste Einstufung die gesamte Bewertung fest:

1. Hoch/Zentral – dies sind alle Technologien, die zukünftig eine große Rolle spielen können.
2. Mittel/Beitrag – dies sind Technologien, die einen Betrag leisten können oder deren Nutzung mit gewissen gesellschaftlichen Einschränkungen verbunden ist.
3. Gering/Nische – Technologien, die mit großen Einschränkungen genutzt werden könnten, oder die für spezielle Anwendungen in Nischen in Frage kommen.

Damit kann man jederzeit recht gut den Stand der Technik und der Diskussion bewerten. So eine einfache Herangehensweise genügt für viele Diskussionen und Anwendungen. Das ursprüngliche Schema wurde um einige der hier erklärten Kennzahlen erweitert. Diese Tabelle wird als Zusammenfassung des Buchs im Kapitel 14 wieder aufgenommen.

**Tabelle 7.2** Energietechniken bewerten

Aspekt	Bewertungskriterien		
	Hoch/Zentral	Mittel/Beitrag	Gering/Nische
Gesamtleistung: Welche Leistung kann mit der Methode langfristig (Jahrhunderte) erzeugt werden?	Es steht eine große Leistung zur Verfügung: Ausreichend, um den heutigen Bedarf zu decken oder mehr.	Es steht eine relevante Leistung zur Verfügung, die einen Beitrag zur Versorgung leistet. Alleine reicht diese Technik jedoch nicht aus.	Es steht keine hohe Leistung zur Verfügung, Beiträge sind gering oder beschränkt.
Wärme: Kann die Technik Wärme zum Heizen bereitstellen?	Ja	Über Elektrizität – Elektrowärme	Nein
Wärme: Kann die Technik Wärme für industrielle Prozesse bereitstellen?	Ja	Über Elektrizität – Elektrowärme	Nein
Elektrizität: Kann die Technik Elektrizität bereitstellen?	Ja	Grundsätzlich ja, aber hoher Aufwand oder niedriger Wirkungsgrad	Nein, oder es macht keinen Sinn
Transport: Kann die Technik hochwertigen Treibstoff bereitstellen?	Ja Dies sind flüssige Brennstoffe mit gutem Heizwert; für Schiffe sind feste Brennstoffe akzeptabel	Ja, aber über Elektrizität	Nein, oder es macht keinen Sinn



Tabelle 7.2 (Fortsetzung)

Aspekt	Bewertungskriterien		
	Hoch/Zentral	Mittel/Beitrag	Gering/Nische
Schwierigkeiten: Heutige technische Schwierigkeiten	Geringe technische Herausforderungen in der Anwendung	Hohe technische Herausforderungen oder aufwändige Technik	Sehr hohe oder ungelöste technische Herausforderungen
Technology Readiness Level	TLR 7 Man kann die Technik heute kaufen und einsetzen	TLR 4 bis TLR 6 Die Technik kann mit guter Wahrscheinlichkeit in absehbarer Zeit gekauft werden	< TLR 4 Die Technik kann möglicherweise irgendwann in der Zukunft zur Verfügung stehen
Kosten: Was kostet die Energie verglichen mit heutigen Preisen netto ohne Steuern und Abgaben?	Kosten vergleichbar oder geringer	Kosten etwas höher, aber tragbar	Kosten sehr viel höher
	Wärme < 0,06 € kWh <sup>-1</sup>	Wärme < 0,12 € kWh <sup>-1</sup>	Wärme > 0,12 € kWh <sup>-1</sup>
	Elektrizität < 0,12 € kWh <sup>-1</sup>	Elektrizität < 0,25 € kWh <sup>-1</sup>	Elektrizität > 25 € kWh <sup>-1</sup>
Gesellschaftliche Kosten: Wer trägt die tatsächlichen langfristigen Kosten von Umweltauswirkungen?	Geringe Externalisierung von Kosten. Diese sind im Preis enthalten oder klar von Steuern und Abgaben abgedeckt	Externalisierte Kosten sind gesellschaftlich bekannt und akzeptiert. Sie sind klar geringer als die Energiekosten	Hoch oder unbekannt: Technik enthält relevante Ewigkeitslasten
Akzeptanz: Ist die Technik gesellschaftlich anerkannt?	Ja Es gibt keine oder vernachlässigbare Opposition	Relevanter Widerstand Eine gesellschaftliche Aushandlung ist notwendig, NIMBY	Nein Gesellschaftlich nicht durchsetzbar
Risiko: Sind die (langfristigen) Risiken gesellschaftlich zumutbar?	Es gibt keine oder geringe Risiken Alle Risiken sind bekannt	Risiken stellen keine Bedrohung der Gesellschaft, ihres Fortbestehens oder der Gesundheit weiter Teile dar	Risiken bedrohen die Gesellschaft als Ganzes, ihr Fortbestehen, die Gesundheit größerer Teile
Hinterhof: Kann die Technik von jedermann in seinem Hinterhof eingesetzt werden?	Ja	Nein, aber die Technik kann in der Nähe von Bevölkerungszentren umgesetzt werden	Nein Weit weg von Menschen
Wirkungsgrad	> 50%	10% bis 50%	< 10%
Fluktuationen: Erzeugt die Technik immer Leistung oder nur manchmal?	Immer, unabhängig vom Wetter oder der Tageszeit	Abhängig von äußeren Faktoren, aber planbar: Nutzungsgrad dadurch > 0,25	Nicht planbar: Nutzungsgrad < 0,25

Aspekt	Bewertungskriterien		
	Hoch/Zentral	Mittel/Beitrag	Gering/Nische
EROI	> 15	7 bis 15	< 7
Erzeugte Energie ist speicherbar?	Ja oder der Zyklusverlust ist < 20%	Mit Aufwand oder der Zyklusverlust beträgt 20% bis 60%	Nein oder der Zyklusverlust ist > 60%
Benötigte Ressourcen für die Technik sind vorhanden?	Ja	Grundsätzlich ja, aber bindet sehr viel Material	Nicht für globale Umsetzung geeignet
Gebundene Ressourcen können leicht wiederverwendet werden?	Ja	mit Verlusten	Nein

## ■ 7.4 Nachhaltige Entwicklung

Ursprünglich stammt der Begriff der Nachhaltigkeit aus der Forstwirtschaft, dort war er eindeutig als solche Wirtschaft verstanden, die einen Forst für alle Zeiten bei möglichst hohem Ertrag und für eine Vielzahl von konkurrierenden Nutzungen gleichbleibend erhält (Carlowitz 1713): Zu seiner Zeit waren Wälder aufgrund der vielen verschiedenen intensiven Nutzungen in einem schlechten Zustand und lieferten oft geringe und abnehmende Erträge. Hier ein rechtes Maß für die Abwägung unterschiedlicher Ansprüche und Nutzungsformen zu finden und so den Wert des Waldes für den Eigentümer langfristig hoch zu halten, war sein Problem. Sein Auftraggeber und Eigentümer war der Landesfürst, der die Lebensverhältnisse und die Wirtschaft in seinem Herrschaftsbereich langfristig sichern und verbessern wollte. Sein Problem ist auch unseres, wenn wir uns als Eigentümer unserer Welt verstehen und unser menschliches Handeln in planetaren Grenzen langfristig sichern wollen (Steffen 2015), für uns ist das System Erde der Forst.

Inzwischen wird der Begriff inflationär und häufig sinnentstellend verwendet: „*Nachhaltiges Wachstum*“ eines Unternehmens soll bedeuten, dass der Ertrag eines Unternehmens über sehr lange Zeit zumindest mit einer gleichbleibenden Wachstumsrate exponentiell oder besser mit einer in der Zukunft weiter ansteigenden Wachstumsrate als hyperexponentielles Wachstum ansteigt – in der stofflichen Welt ist diese Hoffnung innerhalb planetarer Grenzen nicht abbildbar, siehe Kapitel 5.

Aus diesem Grunde verwendet man inzwischen den Begriff „*nachhaltige Entwicklung*“, wenn Bezüge zum langfristigen Handeln in einem in jeder Hinsicht begrenzten System Erde gemeint sind. Dieser Begriff ist oft mit einer Generationengerechtigkeit verbunden, so wie er durch die UN definiert wurde [DIN ISO 26000]:

# Index

## A

Absorption 78, 79  
Abzinsen 132  
Aerosole 265  
Akzeptanz 208  
Ammoniak 308, 345, 438  
Ammonium-Perchlorate Composite  
  Propellant 452  
Anthropozän 291  
Antireflexschicht 382  
Arbeit 46, 49, 62, 63  
  – Dissipation 55  
  – Druckarbeit 63  
  – elektrisch 64  
  – mechanische Arbeit 63  
  – technische Arbeit 63  
  – Volumenarbeit 63  
  – Wellenarbeit 63  
Ariane & Rakete 452  
Asteroiden 110  
Atemwegserkrankung 434  
Atmosphäre 283  
  – als Wärmemaschine 269

## B

BANANA 28  
Bandlücke 380  
Barrel 51  
Barrel of Oil Equivalent 51  
basale metabolische Rate 290  
Batterie 408, 410  
Batteriespeicher 420

BECCS 451, 469  
Benzin 153, 308, 321, 330  
bereitgestellte Energie 178  
Bernoulli-Gleichung 352  
Beste verfügbare Technik (BVT) 440  
Betrieb 184  
Bezugssauerstoff 314, 315, 441  
BlmSchG 60, 310, 314  
Biogas 318, 327, 330  
Biomasse 214, 485  
Bitcoin 248  
Boden 96, 126, 283, 289, 357  
boshafte Probleme 237  
Braunkohle 153, 309, 433  
Brechungsindex 382  
Breitengrad 265  
Brennstoff 306  
  – Brennwert 306  
  – Heizwert 306  
Brennstoffzelle 145, 317  
Brennwert 306  
British Thermal Unit 51  
Bruttosozialprodukt 192  
BTU 51  
Butan 307  
BVT 440

## C

Carbon Capture and Storage 463  
Carnot-Wirkungsgrad 62, 269  
CCS 451, 463, 464, 465  
COP 345  
Curtailling 181, 423

## D

DALY 440, 442  
 Dampfmaschine 317  
 Dampfturbine 146, 317  
 Dänemark 318  
 Darmstadt 429  
 Demonstrator 107  
 Deutschland 204, 273, 353, 369  
 Dienstleistung 83  
 Diesel 153, 308, 317, 321, 330  
 Diesel-Motor 317  
 digitale Infrastruktur 240  
 Digitalisierung 239  
 discounting the future 132  
 Disruption 478  
 Dissipation 46, 55  
 DME 308, 327, 330  
 Downgrade 90  
 Druckarbeit 47  
 Druckluftspeicher 410, 415  
 - Huntorf 417  
 Druckverlust 65, 353  
 Druckverlustbeiwert 65  
 Dung 305, 309, 327, 433  
 Düngemittel 304, 331  
 Düngung 357

## E

Effizienz 226, 244  
 Eiszeit 278  
 elektrischer Isolator 380  
 elektrischer Leiter 379  
 Elektrizität 138, 174, 186, 207  
 Elektrofiter 435  
 Elektron 379  
 Elektrowärme 64, 348  
 Emission 433  
 Emissivität 75  
 - grauer Strahler 77, 81  
 Energie 45, 61, 125, 195  
 - chemische 44, 306  
 - Einheit 50  
 - elektrische 45  
 - Enthalpie 44

- innere 44  
 - kinetische 43, 138  
 - Maßeinheit 494  
 - nukleare 44  
 - potentielle 44, 138, 353  
 - Umwandlung 61  
 Energie als Ressource 95  
 Energiedichte 201  
 Energieeffizienz 61, 197  
 Energieerhaltung 47  
 Energiekannibalismus 479, 482  
 Energieklippe 190  
 Energiepflanzen 329  
 Energiesklave 52  
 Energiespeicher 202  
 Energieträger  
 - fossil 105  
 Energie und Geldwert 192  
 Energieversorgung 215  
 Energiewende 195, 197, 206, 473, 478, 479  
 energy-cliff 191  
 Energy-Payback Zeit 180  
 Energy Stored on Energy Invested 407  
 Entropie 43, 54, 62, 80, 126, 295  
 - Erzeugung 54  
 - makroskopisch 56  
 - Mischen 55  
 - spezifische 55  
 EOL 91  
 Erdachse 277  
 - Neigung 277  
 Erde 71  
 - Atmosphäre 260  
 - Einstrahlung 265  
 - Entropiebilanz 265  
 - Geometrie 259  
 - solare Einstrahlung 260  
 - System 259  
 - Treibhauseffekt 264  
 - Wärmestrom 262, 263, 265, 269  
 - Wind 270  
 Erderwärmung 284, 457  
 Erdgas 67, 152, 153, 198, 283, 305, 308,  
 330, 406, 446  
 - Reichweite 198

Erdöl 67, 152, 153, 198, 283, 304, 405  
– Reichweite 198  
Erdumlaufbahn 277, 391  
EROI 175, 411, 423, 476, 481, 484  
– Aufbereitung 185  
– Energieträger 184  
– Kraftwerk 178  
– Lebensmittel 329  
– Primärenergie 175  
– Systemgrenze 182  
ESOI 407, 410, 424  
Estland 333  
Ethan 307  
Ethanol 330  
Exergie 139  
externalisierte Kosten 476  
Extrahiert 100  
Extraktion 151  
Extremwetter 361

## F

Ferrel-Zelle 269, 270  
Festland 267  
feuerungstechnischer Wirkungsgrad  
310, 311  
Filter 435  
Flugasche 434  
Flugkoks 434  
Flüsse 269  
Flüssiggas 153  
Flüssiggas 152, 305, 330  
Flussmühle 354  
fossile Brennstoffe 321  
fossile Energieträger 198  
fühlbare Wärme 48, 427

## G

GADSL 88  
Galeere 52  
Gaskonstante  
– allgemein 493  
– allgemeine 60  
– spezielle 59

Gasmotor 317  
Gasturbine 139, 148, 317  
Gebäudeisolierung 346  
Gebundene Energie 409  
Geldwert und Energie 192  
Generator 146  
Geoengineering 298, 449, 450, 460  
Geothermie 347, 485  
Geschichten 256  
Gewässer 267  
Gezeitenkraftwerk 361, 485  
Gips 436  
Global Warming Potenzial 279  
Golfstrom 360  
Gouy-Stodola Theorem 57, 139, 296  
Großprojekt 356  
Güter 83  
GWP 279

## H

Hadley-Zelle 269, 270  
Halbleiter 380  
Harnstoff 438  
Heizung 305, 340  
Heizwert 306  
Heliostat-Konzentrator 342  
Hochofen 303, 310  
Holozän 291  
Holz 305, 309, 318, 327, 433  
Holzkohle 309, 327

## I

ideale Flüssigkeit 60  
– Enthalpie 61  
Ideales Gas 59  
IED 314  
IMDS 88  
Induktive Erwärmung 64  
industrielle Revolution 195, 303  
Infrastruktur 224  
Instandhaltung 90  
Intermittenz 201, 396  
investierte Energie 179

Isentropenexponent 267

Israel 342

## J

Jahreszeit 265

Joule Vergleichsprozess 139

## K

Kalium 287

Kaliumdünger 331

Kalorie 51

Kälte 138

Kältemaschine 344

Kältemittel 445, 459

Kapital 95, 117, 125

KEA 93, 85, 160, 163

Kernenergie 336

Kernfusion 338

Kernspaltung 336, 485

Kernthesen 7

Kerosin 153, 308, 317, 321

Kilowattstunde 51

kinetische Energie 351

Klima 225, 231, 265, 291

Klimaanpassung 233

Klimasensitivität 279

Kohle 153, 198, 283, 305, 309, 405, 433,  
439, 446, 477

– Reichweite 198

Kohlekraftwerk 148

Kohlendioxid 277, 278, 279, 280, 281,  
282, 284, 288, 444, 445, 458

Kohlenmonoxid 308, 437

Kompression

– Isentrop 462

Konsistenz 227, 245

Konvektion 70

Konzentratorverhältnis 341

konzentrierte Solarthermie 340

Kosten-Nutzen Analyse 129

Kraftwerk 155

Krise 486

– fünf Phasen 486

## L

Lachgas 280, 330, 331, 445, 446, 458

Ladungen trennen 380

Lagerstätte 405

Lagrange-Punkt L1 452

Lambert-Beer Gesetz 79

Landfläche 96, 292

Landnutzung 98

Landwirtschaft 291, 356

Längengrad 391

latente Wärme 48, 428

Laufwasserkraftwerk 355

LCA 93

Lebensweg 83, 86, 240

– Entsorgung 87

– Extraktion 86

– Herstellung 86

– Lebensende 91

– Nutzung 87

– Nutzungsphase 89

– Systemgrenze 85

– Umweltauswirkung 87

– Urformen 86

– Vertrieb 86

Lebenswegbetrachtung 83, 84

Lebenszyklusbetrachtung 85

Leistung 49, 63, 125

Leistungsziffer 345

Leitungsband 379

Licht 287

logistisches Wachstum 134

Luft

– feucht 267

– trocken 266

Luftbedarf 313

Luftfeuchtigkeit 267, 269

Luftmasse 274, 382, 392

Luftvorwärmung 310

Luftzahl 313

## M

Magnesium 287

Mars 110

Meeresströmung 269, 360  
Megafauna 291  
Menschen 97  
Methan 280, 281, 307, 445, 458, 459  
Methanol 308, 330  
Mikrowelle 72  
Milanković Zyklen 277  
Minimumgesetz 286  
Mischen 55  
mittlere Kraftwerksleistung 147

## N

nachhaltige Entwicklung 209  
Nahrungsmittel 292  
Nennleistung 143  
Net-Energy 173, 179  
NIMBY 28, 208  
NMVOC 445  
Nordstream 67  
Normbedingung 60, 441, 493  
Nutzenergie 162  
Nutzungsdauer 90  
Nutzungsende 91  
Nutzungsgrad 147, 150  
– Flugzeug 150  
– LKW 150  
– öffentlicher Verkehr 150  
– PKW 150  
– Schiff 150  
Nutzungsintensität 90  
Nutzungskonkurrenz 289, 328

## O

ÖE 51  
Ökobilanz 93  
Ökosystem 97, 292  
Öleinheit 51  
Ölsand 308  
Ölschiefer 308, 333  
optische Strahlung 65  
Organische Brennstoffe 318, 327  
Organismen 96  
Otto-Motor 317

Oxyfuel 310  
Ozean 283

## P

Parabolrinnen-Konzentrator 342  
Peak-X 103, 106  
Permafrost 283  
Phosphor 287, 331  
Photon 71, 380  
Photostrom 383  
Photosynthese 286, 290, 434  
Photovoltaik 145, 148, 378, 382, 485  
– Ausrichtung 394  
– Cadmium-Tellurid 386  
– CIGS 387  
– Deutschland 394, 396  
– Dünnschicht 386  
– EROI 388  
– Ertrag 384, 393  
– Flächenbedarf 395  
– Gallium-Arsenid 387  
– Intermittenz 396  
– Lebensdauer 384  
– Perovskite 388  
– Shockley-Queisser 382  
– Silizium 386  
– Wirkungsgrad 382, 384  
Photovoltaikmodul 382  
Photovoltaikzelle 379, 381  
Pipeline 67  
Planck'sche Formel 74  
planetare Grenzen 211, 224, 480  
Plasma 65  
Polare Zelle 269, 270  
Polarkreis 391  
Potential 99, 100  
potentielle Energie 351  
Power-to-Gas 421  
– Erdgas 422  
– Wasserstoff 421  
Power-to-X 421  
– DME 423  
– Methanol 422  
Primärenergie 161, 172

Primärenergieträger 100, 125, 155, 161  
 Problem  
 – hinterhältig 16  
 – tame 16  
 – wicked 16  
 – zahmes 16  
 Produkt 83, 84  
 Produktlebensweg 151  
 Produktsicherheit 111  
 Propan 307  
 Prototyp 107  
 Prozess 45, 46  
 – stationär 50  
 Prozessgröße 45  
 Pumpspeicher 409, 410, 412

## Q

Qualität der Energie 137

## R

R134a 280  
 radiative forcing 278, 450  
 Rauchgas 314  
 Rauchgaswäsche 436  
 Rauigkeit des Geländes 371  
 REACh 88  
 REACh Verordnung 88  
 Recht 97  
 Reflektion 78  
 Regen 271  
 regenerative Energietechnik 477  
 Reibung 46  
 Reichweite 198  
 – dynamisch 199  
 – statisch 101, 198  
 Reichweite eines Rohstoffes 101  
 Reserve 99, 100, 103  
 Resilienz 222, 245  
 Ressourcen 94, 99, 100  
 Ricardian Land 96, 126, 289, 292  
 Risiko 208  
 Risikobetrachtung 110  
 Risikomanagement 111, 113

Rohrreibungszahl 66  
 Rohstoff 98, 99  
 – Lagerstätte 102  
 Rohstoffaufbereitung 152

## S

Sauerstoff 288  
 Sauerstoffbedarf 312  
 Schadstoff 433  
 – Asche 433  
 – Grenzwert 440  
 – Kohlendmonoxid 437  
 – NMVOC 439  
 – Schwefel 435  
 – Schwefelsäure 436  
 – Schwefelwasserstoff 436  
 – Staub 433  
 – Stickoxid 437  
 – VOC 439  
 Schwefel 435, 455  
 Schwefelhexafluorid 445  
 Schwefelsäure 436, 456  
 Schweröl 308  
 SCR 438  
 SDG 211  
 Sekundärenergie 162  
 Siegert'sche Formel 311, 312  
 Silizium 304, 318  
 SKE 51  
 SMART 255  
 smart grid 247  
 SNG 422  
 Solar 144, 148  
 Solare Einstrahlung 96, 390  
 Solares Spektrum 274  
 Solarkollektor 339  
 Solarthermie 146, 339, 485  
 – ohne Konzentration 339  
 Solutionismus 239, 240  
 Sonnenhöhe 392  
 Sonnensegel 452  
 Speicherdichte 409  
 Speichereffizienz 410  
 Speicherentladung 408



- Speicherzyklen 407  
Spezies 97  
Stahl 304  
Staudinger Kraftwerk 442  
Stefan-Boltzmann Gesetz 75  
Steinkohleeinheit 51  
Stickoxid 437  
– Brennstoff 437  
– katalytische Reduktion 438  
– prompt 438  
– thermisch 437  
Stickstoffdünger 287, 328, 331  
stöchiometrische Verbrennung 312  
Stoff 95, 124  
Stoffmenge 59  
Strahlung 70, 138  
– Emissivität 75  
– Entropie 80  
– Infrarot 72, 73  
– Kirchhoffs Gesetz 78  
– Mikrowelle 73  
– optische 71, 72, 74  
– Radio 73  
– schwarzer Körper 74  
– sichtbar 72, 73  
– Ultraviolett 72, 73  
Strahlungstreiber 278, 450  
Streuung 79  
Stroh 305, 309, 327, 433  
Strommix 173  
Subventionen 477, 484  
Suffizienz 229  
superboshafte Probleme 237  
Sustainable Development Goals 211  
Swansea Sea-Wall 362  
Synthetisches Erdgas 422  
System 41, 42, 43  
System Erde 259  
Systemgrenze 41, 42  
Szenario 473
- T**
- Tausend Jahre Kohle 122  
Technologiewechsel 478  
Technology Readiness Level 108, 208, 485  
Technosphäre 294  
Teersand 153  
Temperaturgrenze 289  
Thermodynamik 4  
thermodynamisches Gleichgewicht 42  
Thermoelektrik 399  
Tideenergie 145  
Tidenhub 361  
Tideströmung 360  
TLR 108  
TÖE 51  
Tonne Öl 51  
Tons of Oil Equivalent 51  
Torf 309, 433  
Transmission 78  
Transport 154, 185, 207, 321  
Treibhauseffekt 273, 277  
Treibhausgas 278, 444  
– Abscheiden 461  
– Deponie 462
- U**
- Umbau 90  
Umgebung 41  
Umweltauswirkung 31  
Upgrade 90  
Urformen 156
- V**
- Valenzband 379  
VDI 4605 229  
Vegetation 267  
Verbrennungstemperatur 309  
Verdopplungszeit 120  
Verdunstung 271  
Verdunstungsenthalpie 267  
Vergleichsprozess 144  
Verkehrswende 197, 322  
Verpackung 154  
VOC 445, 459  
Volumenarbeit 47, 63

**W**

Wachstum 117  
– exponentiell 118  
– logistisch 134  
– Verdopplung 120  
– Zeitintegral 121  
Wachstumsrate 118  
Walchenseekraftwerk 359  
Wärme 45, 48, 49, 54, 62, 64, 138, 207,  
303, 485  
– Transport 54  
Wärmeleitung 70  
Wärmepumpe 344, 346, 347  
Wärmespeicher 348, 426, 429  
Wärmestrahlung 309  
Wärmestrom 49  
Wärmeübertragung 70  
Wärmewende 197  
Warmzeit 278  
Wartung 90, 155  
Wasser 96, 144, 287  
Wasserdampf 275, 281  
Wasserkraft 351, 406, 408, 485  
– EROI 357  
– Nutzhöhe 352  
– Treibhausgase 358  
– Umweltauswirkung 356  
Wasserkreislauf 271, 272  
– Daten 272  
Wasserstoff 307, 452  
Wellen 269  
Wellenarbeit 138  
Wetter 265, 289

Wien'sches Verschiebungsgesetz 77  
Wind 144, 148, 267, 269  
– nutzbare Energie 365  
Windgeschwindigkeit 370  
Windkraft 365, 485  
– Anlagengröße 375  
– Anordnung 368  
– Aufstellen 373  
– Windpark 368  
– Wirkungsgrad 367  
Windscherexponent 371  
Windturbine 146  
Wirkungsgrad 61, 143, 208  
– Aufwand 144  
– Nutzen 144  
wissenschaftlich 20

**Y**

YOLL 440, 441

**Z**

Zement 304  
Zenitwinkel 392  
Zustand 42, 43  
Zustandsänderung 46  
Zustandsgleichung des idealen Gases  
59  
Zustandsgröße 43  
Zyklenzahl 410  
Zyklonabscheider 434  
Zykluseffizienz 408