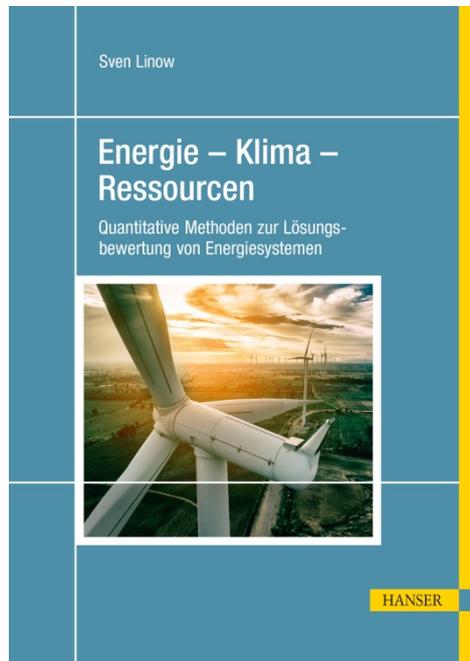


HANSER



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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vorwort

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

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

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

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

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

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

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

Darmstadt, September 2019

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 kg m^{-3} und einen Heizwert von 25 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 kg m^{-3} und einen Heizwert von 9 MJ kg^{-1} . Darmstadt mit seinen 160 000 Einwohnern erstreckt sich auf einer Fläche von 112 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 km^3 und für Steinkohle $3,00 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ oder 3000 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 τ , 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 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 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 CO_2 gleich dem Volumen an CH_4 oder $680 \cdot 10^{12} \text{ m}_N^3$.

Umweltauswirkung

F: Welche Konzentration erreicht das atmosphärische CO_2 insgesamt, wenn das gesamte 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 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 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 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 mm² und eine Aluminium-Ummantelung (in dem der wesentliche Anteil des Stromes fließt), von 240 mm². 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⁻¹. 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

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

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

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

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 ⁻¹	Wärme < 0,12 € kWh ⁻¹	Wärme > 0,12 € kWh ⁻¹
	Elektrizität < 0,12 € kWh ⁻¹	Elektrizität < 0,25 € kWh ⁻¹	Elektrizität > 25 € kWh ⁻¹
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
- BImSchG 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