

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