
Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Teil I Vorbetrachtungen	1
Teil II Themen	7
1 Was ist Energie?	9
1.1 Energie – Das Phänomen	12
1.2 Energie – Alles in Ordnung?	13
1.3 Temperatur ist keine Wärme	16
2 Elektroenergie	17
2.1 Elektroenergiesysteme	17
2.1.1 Struktur der Drehstromnetze	18
2.1.2 Das elektrische Verbundsystem	22
2.2 Transport und Übertragung elektrischer Energie	24
2.2.1 Hochspannungs-Drehstromübertragung	24
2.2.2 Freileitungen versus Erdkabel	25
2.2.3 Hochspannungs-Gleichstromübertragung	38
2.2.4 Blindleistungskompensation	47
2.2.5 Versorgungszuverlässigkeit, -Sicherheit und Verfügbarkeit	52
2.2.6 Technische Sicherheit der Kernkraftwerke in Deutschland	90
2.2.7 Versorgungssicherheit mit Kernbrennstoffen	102
2.2.8 100 % Strom aus „Erneuerbaren“ – Vision oder Fiktion?	109
3 Stromeinspeisung	117
3.1 Alles vernetzt	117
3.2 Smart Grid, Smart Meter, Smart Home und virtuelles Kraftwerk	122
3.2.1 Definition des Begriffs „Smart Grid“	122

3.3	Hierarchie der Smarten	125
3.3.1	Supersmart Grid	125
3.3.2	Supergrid	127
3.3.3	Smart Grid	128
3.3.4	Smart Meter und Smart Home	128
3.3.5	Smart Grain	133
3.3.6	Virtuelles Kraftwerk	134
3.3.7	Hybridkraftwerk	135
3.3.8	Smarts und Virtuelle	137
3.3.9	Digitalsignalzeitalter und Datenmenge	140
3.4	Erneuerbare: Gibt es einen Plan B für die Versorgungssicherheit?	140
4	Energiespeicherung	143
4.1	Pumpspeicherkraftwerke	143
4.1.1	Strom von der Sohle, Strom vom Turm	147
4.1.2	Strom von der Halde	148
4.1.3	Strom von der Kante	148
4.1.4	Strom von der Wasserstraße	148
4.1.5	Strom aus dem Pool	149
4.1.6	Strom vom Poller	152
4.1.7	Strom vom Pressluftballon	153
4.1.8	Strom vom Dampfspeicher	154
4.2	Kosten der Speicherung	154
4.3	Derzeit technische Möglichkeiten der Elektro-Energiespeicherung	156
4.3.1	Die chemischen Elemente	157
4.3.2	Etwas zur Speicherkapazität	160
4.3.3	Redox-Flow-Akku	161
4.3.4	Doppelschichtkondensator	162
5	Elektromobilität	163
5.1	Ladekonzepte	164
5.2	Oberleitung über der Autobahn	165
5.3	Kleiner Rückblick in die Historie der E-Mobilität	166
5.4	Lithium-Ionen-Akku – Spannung aus Salzen	169
5.4.1	Polymerer Zinn-Schwefel-Lithiumionen-Akku	171
5.4.2	Lithium-Luft-Akku	171
5.5	H ₂ -Speicherung und mehr	171
5.6	Schlaglöcher – Die induzierenden Energiequellen	173
6	Szenarien und Prognosen für unsere Elektro-Energieversorgung	175
6.1	Szenarien im EU-Energiefahrplan 2050	176
6.2	Die ethische Komponente des „Atomausstiegs“	177

7	Nachhaltigkeit der elektrischen Energieversorgung	181
7.1	Perspektiven der Solar- und Windenergie für eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland	181
7.1.1	Anforderungen an nachhaltige Energiesysteme	181
7.1.2	Nachhaltigkeit verschiedener Stromerzeugungssysteme	183
7.2	Kumulierter Energieaufwand	184
7.2.1	Materialaufwand	185
7.2.2	Kumulierte Emissionen	186
7.3	Gesundheitsrisiken	187
7.4	Gesamtwirtschaftliche Kosten	188
8	Daseinsvorsorge im Dilemma	191
8.1	Arbeitsplätze – Das Totschlagargument	194
8.2	Statistikeffekt: Energieeffizienzziel erreicht	197
9	Die CO₂- bzw. Klimaneutralität für die Atmosphäre	199
9.1	Diskriminierung passée	205
9.2	Die Klimakontroverse	207
9.2.1	%, ‰, ppm, ppb, ppt und CO ₂ -Gehalt im Vergleich	209
9.3	Kein Recht auf billige Energie	211
9.4	Wetterrekorde und Klimawandel	211
10	Die Bürde der Kohle – oder ... ?	213
10.1	Das Kreuz mit den CO ₂ -Emissionen	213
10.2	„Schmutziger“ Strom – Heiß begehrt	214
10.3	Ein Kreuz mit der Kohle – ...? Oder?	215
10.4	Inkohlung	217
10.5	Kunststoff aus CO ₂ ?	218
11	Die alten „Erneuerbaren“	219
11.1	Wasserkraftwerke	219
11.1.1	Wasserkraft, die Rauschende	219
11.1.2	Wasserkraftwerke im Öko-Blickpunkt	222
11.2	Energie aus Fließwasser	223
11.2.1	Laufwasserkraftwerke	223
11.2.2	Flusswasser-Kraftwerk alias Schiffmühle	224
11.2.3	Senkkasten-Kraftwerk	226
11.2.4	Drallströmungs-Wasserrad	227
11.3	Turbinenbauarten – Kleine Typenkunde	228
11.3.1	Kaplanturbine	228
11.3.2	Francisturbine	228
11.3.3	Pelton-turbine	229

11.3.4	Ossberger-Turbine	230
11.3.5	Cink-Banki-Turbine	230
11.3.6	Dérial-Turbine	230
11.3.7	Turgo-Turbine	231
12	Die neuen „Erneuerbaren“	233
12.1	Energie aus Unterwasser-Strömung	233
12.1.1	Energie aus gleichbleibender Strömungsrichtung – Strom aus der Strömung	233
12.1.2	Energie aus reversierender Strömung	235
12.1.3	Energie aus Wasserwellen	239
12.2	Solarenergieanlagen: Solarkraft, die Elektrizierende	257
12.2.1	Photovoltaikanlagen: Alternativ, additiv, subtraktiv?	257
12.3	Sonnenstrom aus der Wüste	287
12.3.1	DESERTEC? – War was?	294
12.3.2	DESERTEC? – Ist doch was?	296
12.3.3	Desert Power 2050	297
12.4	Die Nutzung des Windes	300
12.4.1	Evolution	300
12.4.2	Energie und Leistung im Wind	303
12.4.3	Effizienz einer Windenergieanlage	306
12.4.4	Energiegenerierung	310
12.4.5	Rechnerische Abschätzung des Energieertrages	310
12.4.6	Energie weggeblasen	312
12.4.7	Von Growian zu Berwian	318
12.4.8	Aus Verlust zu Gewinn durch Faktor 10 – Gewinn aus Verlust	319
12.4.9	Aufwindkraftwerke – Strom aus dem Kamin	319
12.4.10	Fallwindkraftwerke – Strom fällt vom Himmel	321
12.4.11	Fliegende Kraftwerke –Strom durch Drachen, Strom vom Aeroplane	323
12.5	Windenergieanlagen (WEA) – Daten, Fakten 2011	325
12.5.1	Statistik	325
12.5.2	Windenergieanlagen (WEA) – Daten, Fakten 2012	339
12.5.3	Die externen Kosten, Vermeidungsgrenzkosten, Grenzscha­denskosten	339
12.5.4	Subventionierung ^{plus}	340
12.5.5	„Windstrom“ ist weniger wertvoll	342
12.5.6	Umweltschutz, Ressourcenschutz	344
12.5.7	Hölzerne Riesen	346
12.5.8	Recycling der Rotorblätter	346
12.5.9	Onshore-Windenergieanlage (WEA) versus Braunkohle- kraftwerk (BKW) – Eine vergleichende Betrachtung	347

12.5.10	Offshore-Windenergieanlage (WEA) versus Braunkohle- kraftwerk (BKW) – Eine vergleichende Betrachtung	348
12.5.11	WEA: Materialmasse, Investitions- und Rückbaukosten, Erntefaktor	350
12.5.12	Energetische Amortisation auf der Basis des BIP	352
12.5.13	Exkurs: Offshore-Windpark	354
12.5.14	Leistungskredit der WE-Anlagen	369
12.5.15	Seltene Erden – Seltenerdmetalle	370
12.5.16	Neodym – Aus der Tiefe in die Höhe	373
12.6	Der Paradigmenwechsel – Von der Windenergieanlage hin zum Windenergie-Kraftwerk	376
12.6.1	Das Getriebeproblem	383
12.6.2	Zweiblattrotoren im Windenergieanlagen-Bouquet	392
12.6.3	Einblattrotoren – Die Minimalisten	393
12.7	Geothermie-Kraftwerke	394
12.7.1	Erdwärme – hydrothermal und petrothermal erschlossen	394
12.7.2	Erdwärme und Rankine-Prozess	396
12.7.3	Erdwärme und Kalina-Prozess	397
12.7.4	Kraft-Wärme-Kopplung	399
12.7.5	Kraft-Wärme-, Wärme-Kraft-Kopplung und Dampfexpansionsmotor	400
12.8	Biomasse-Kraftwerke	403
12.8.1	Biomasse	403
12.8.2	Die CO ₂ -Neutralität der Biomasse – Eine zeitgemäße schöne Mär	405
12.8.3	Strom mit virtuellem Wasser – Betrachtungen zu Biomasse und Biomüll	407
13	Die Etablierten	411
13.1	Kohlekraftwerke	411
13.1.1	Kraftwerk mit Kohleverbrennung	411
13.1.2	Kohlevergasung statt Kohleverbrennung	414
13.1.3	CO ₂ -Abtrennung und -Sequestrierung	416
13.2	Gaskraftwerke	423
13.3	GuD-Kraftwerke	424
14	Auf Bewährung	429
14.1	Brennstoffzelle – Der Edelstein	429
14.2	Brennstoffzellen-Typen	431
14.3	Etwas zur Historie der Brennstoffzelle	433
14.4	Die Brennstoffzellen in Gegenwart und Zukunft	433
14.4.1	Gut Ding will Weile haben	434
14.5	Stirling-Motor	435

15 Nuklearkraftwerke	437
15.1 KKW-Generationen und Technologieentwicklungen	437
15.1.1 Globale Brückentechnologie	439
15.1.2 Technisch fortschrittliche Nuklearkraftwerkstechnologien	440
15.1.3 Zukunft der Kernkraftwerke	447
15.1.4 Lange Restlaufzeit nach dem Ausstieg	452
15.2 Leichtwasserreaktoren	456
15.2.1 Spalten, solange die Kette hält	456
15.2.2 Naturreaktor von Oklo	457
15.2.3 Die Kernspaltung	458
15.2.4 Die natürliche Kontrolle: Der Moderator Wasser	459
15.2.5 Die technische Kontrolle: Leistungsregelung beim SWR	459
15.3 Uran – Der Kernspaltstoff	461
15.3.1 Urangestehung	461
15.3.2 Anreicherung von Uran-235	461
15.3.3 Herstellung von Brennelementen	462
15.3.4 Stoffflusskette	462
15.4 Betrachtungen zu Energiegehalten	464
15.4.1 Nachwärme	465
15.5 Transmutationsreaktor	466
15.5.1 Transmutation	466
15.6 Partitionierung	469
15.6.1 Kernspaltung ohne selbsterhaltende Kettenreaktion – Der Einstieg	470
15.7 Spallation	471
15.7.1 Funktionsprinzip der Spallation	472
15.8 Fusionsreaktoren	472
15.8.1 ITER	475
15.8.2 Stellarator	477
15.8.3 Kernfusion im Reaktor im Zeitraffer	478
15.9 Brennstoffbedarf eines 1.000-MW-Kraftwerks pro Jahr	479
16 Radioaktivität	481
16.1 Alles kommt raus	481
16.1.1 Die Dosis macht's	483
16.2 Radiologie	485
16.2.1 Die verunsichernde Vielfalt	485
16.2.2 Zur Begrifflichkeit DOSIS	485
16.2.3 q -FAKTOR	487
16.2.4 Ionisierende Strahlung – Becquerel und Verwandtschaft	487
16.3 Unser Leben mit der Radioaktivität	488
16.4 Strahlen-Exposition	492
16.5 Radioaktiver Zerfall, Zerfallskonstante, Halbwertszeit	493

17	Entsorgungssicherheit – Lagerung von radioaktiven Produkten	497
17.1	Konditionierung	501
17.2	Nukleares Recycling	502
17.3	CASTOREN und ihr Innenleben	504
17.4	Spezialisten für alle Fälle	505
17.5	„Endlagerung“ in Salz, Granit oder Ton?	506
17.5.1	Schaufensterpolitik	509
17.5.2	„Endlagerung“ im Salz	510
17.6	„Endlager“? Unnötig!	514
18	Erdbeben – eine Abschätzung der seismischen Energie	515
19	Die „Energiewende“ – fünf Betrachtungen	519
20	Nachhaltige Energiewirtschaft	539
20.1	Stromwirtschaft versus Wasserstoffwirtschaft	539
20.2	Wasserstoffwirtschaft versus Stromwirtschaft	540
20.3	Echt und unecht in der Gegenüberstellung	542
20.4	Die Energie-Effizienzen im Vergleich	542
20.5	Wende? – Woran hapert's?	543
20.6	Ausblick	544
21	Energetische Autarkie	545
21.1	Wirkungsgrad, Erntefaktor, Nutzengrad	545
21.2	Windenergieanlage (WEA) versus Kernkraftwerk (KKW)	546
Teil III	Nachbetrachtung	549
Teil IV	Anhang	553
A1	Physikalische Größen	555
A1.1	SI-Basiseinheiten (Système International d'Unités)	556
A2	Umrechnungstabelle einiger Energie-Maßeinheiten	557
A3	Griechisches Alphabet	558
A4	Zehnerpotenzen und Vorsatzsilben	559
A5	Energieformen	560
A5.1	Bewegungsenergie (kinetische Energie, Gravitationsenergie)	560
A5.2	Bewegungsenergie (rotierender Körper)	560
A5.2	Chemische Energie	561
A5.3	Lageenergie (potenzielle Energie)	561
A5.4	Energie allgemein wegen der Äquivalenz von Energie und Masse	561
A5.5	Energie im elektro-magnetischen Feld	561
A5.6	Energie im elektrischen Feld	562

A5.7	Elektrische Energie	562
A5.8	Thermische Energie (Innere Energie, Enthalpie)	562
A5.9	Strahlungsenergie (Energie elektromagnetischer Wellen)	562
A5.10	Kernspaltungsenergie (schwere Atomkerne)	563
A5.11	Kernfusionsenergie (leichte Atomkerne)	563
A6	Die Axiome der Thermodynamik	563
A6.1	Nullter Hauptsatz der Thermodynamik	563
A6.2	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	564
A6.3	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	566
A6.4	Dritter Hauptsatz der Thermodynamik	568
A7	Konversionstabelle (basierend auf IEA-Umrechnungsfaktoren)	569
A8	Konversionsfaktoren in der Gaswirtschaft	569
A9	Eigenschaften gasförmiger Energieträger	570
A10	Kraftstoffe für Fahrzeuge	570
A11	Kennwerte flüssiger Kraftstoffe	572
A12	Standard-Umrechnungsfaktoren für Rohöl	572
A13	Eigenschaften von Erdöl und Erdölprodukten	573
A14	Eigenschaften von Festbrennstoffen	573
A15	Heizwerte der Brennstoffe für die Wärmeerzeugung und Stromgestehung in Kraftwerken	574
A16	Spezifische CO ₂ -Emissionen der Stromgestehung	575
A17	CO ₂ -Äquivalent	575
A17.1	CO ₂ und mehr	576
A18	SO ₂ -Äquivalent	579
A19	Radioaktivität von 100 Tonnen Reaktorbrennstoff	580
A20	FAME (Fatty Acid Methyl Ester)/Biodiesel	581
A20.1	Methanol: Kunstwort aus Methan und Alkohol	581
A20.2	RME: RapsMethylEster	581
A21	Energiebereitstellung aus Biomasse	582
A21.1	Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen und Strom	583
A22	Luftüberschusszahl (Luftüberschuss)	584
A22.1	Verbrennung	584
A22.2	Mindestluftbedarf	585
A22.3	Vergasung	586
A22.4	Pyrolyse	586
A23	Alles Bio, Öko sowie auch klima- und CO ₂ -neutral?	587
A24	Windenergieanlage (WEA): Energie-, Leistung oder Strom?	587
A25	WEA: Anström-Windgeschwindigkeit (v) und Windleistung (P_W)	593
A26	Windleistung (P_W) _{max} und Rotorleistung (P_R) _{theor} bzw. Betriebsleistung (P_B) _{real} einer 2,3-MW-WEA	594
A27	Eisbildungs- bzw. Eisablagerungsbedingungen an einer WEA	595

A28	Können Eissensoren eine WEA-Rotorblattvereisung detektieren?	598
A29	Eiswurf von Windenergieanlagen (WEA)	601
A29.1	Die „Faust-Formel“	603
A29.2	Eisfallweite (bei Rotorstillstand)	604
A30	Mathematische Formulierung der WEA-Eiswurfweite	604
A31	WEA-Rotorblatt(teil)abriss	608
A32	WEA: Umgekippt	609
A33	Windenergieanlagen suchen Nähe	610
A34	Windenergieanlagen-(WEA-)Abstand	611
A35	Schalldruckpegel	614
A35.1	Frequenzbereiche	615
A35.2	Windenergieanlagen versus Vogelwelt	615
A36	Wasserstoff und Methan im Datenvergleich	616
A37	Eis: Wärmespeicher und -speicher	616
Teil V	Erläuterungen	621
	Zu Kapitel 1: Was ist Energie?	623
	Energiebilanz bei der Kernspaltung	624
	Einsteinsche Energie-Massen-Relation	627
	Energiegestehung aus Kernspaltung	629
	Kernspaltung – Eine epochale Entdeckung	629
	Zu Kapitel 2: Elektroenergie	631
	Zu Kapitel 2.1.2: Das elektrische Verbundsystem	633
	Zu Kapitel 2.2.2.1: Drehstrom-Freileitungen (-Kabel)	635
	Zu Kapitel 2.2.4.2: Der Wechselstromkreis	636
	Schaltung von Spule und Kondensator	643
	Elektrische Leistung und Arbeit (Energie)	644
	Drehstrom – Dreiphasiger Wechselstrom	647
	Zu Kapitel 2.2.5.5: Der Haushaltsstrompreis (Stromgestehungskosten)	650
	Zu Kapitel 2.2.5.8: Etwas zum Ausbau der Stromverteilnetze	652
	Zu Kapitel 3: Stromeinspeisung	655
	Zu Kapitel 3.3.7: Hybridkraftwerk	655
	Zu Kapitel 4: Energiespeicherung	658
	Zu Kapitel 4.1: Pumpspeicherkraftwerke	658
	Zu Kapitel 4.3.2: Etwas zur Speicherkapazität	666
	Zu Kapitel 12: Die neuen „Erneuerbaren“	667
	Zu Kapitel 12.2: Solarenergieanlagen: Solarkraft, die Elektrisierende	667
	Zu Kapitel 12.4.2: Energie und Leistung im Wind	675
	Zu Kapitel 12.4.3.1: Energie im Wind	676
	Zu Kapitel 12.4.3.2: Leistung im Wind	677
	Zu Kapitel 12.4.5: Rechnerische Abschätzung des Energieertrags	678
	Zu Kapitel 12.6: Der Paradigmenwechsel – Von der Windenergieanlage hin zum Windenergie-Kraftwerk	682

Zu Kapitel 19: Die „Energiewende“ – fünf Betrachtungen	683
Diskursive Statements: Nur so rausgerutscht?	684
Korrelation der Einspeisung aus Windkraftanlagen macht Grundlastfähigkeit in Deutschland unmöglich	684
<i>Detlef Ahlborn</i>	
Statistik und Verfügbarkeit von Wind- und Solarenergie in Deutschland	691
<i>Detlef Ahlborn</i>	
Zur Effizienz der Energiewandlung beim Power-To-Gas-Verfahren	701
<i>Detlef Ahlborn</i>	
Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen als Träger der deutschen Energiewende	707
<i>Friedrich Keller</i>	
Begriffserklärungen	741
Verwendetes Schrifttum	748
Literaturhinweise	757
Sachwortverzeichnis	759
Personenverzeichnis	779

Elektrischer Strom

Gestehung, Übertragung, Verteilung, Speicherung und
Nutzung elektrischer Energie im Kontext der
Energiewende

Niederhausen, H.; Burkert, A.

2014, XVIII, 783 S. 162 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-8348-2492-9