

Panos Konstantin

# Praxisbuch Energiewirtschaft

Energieumwandlung, -transport  
und -beschaffung im liberalisierten Markt

*3. Auflage*

VDI



 Springer Vieweg

---

# Praxisbuch Energiewirtschaft

---

Panos Konstantin

# Praxisbuch Energiewirtschaft

Energieumwandlung, -transport  
und -beschaffung im liberalisierten Markt

3., aktualisierte Auflage

Dipl.-Ing. Panos Konstantin  
Burgstetten, Deutschland

ISBN 978-3-642-37264-3  
DOI 10.1007/978-3-642-37265-0

ISBN 978-3-642-37265-0 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, 2009, 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

## Geleitwort

Seit die Menschheit den Sprung in die Industriegesellschaft geschafft hat, steht die Nutzung von Energie als wesentlicher Produktionsfaktor im Mittelpunkt des Fortschritts. Die Bereitstellung von Energie für den täglichen Bedarf von Haushalten und Unternehmen ist für die Industrieländer zu einer Selbstverständlichkeit geworden, ein komfortables Niveau, das Schwellen- und Entwicklungsländer ebenfalls anstreben.

Vor diesem Hintergrund kommt der Energiewirtschaft als einer der herausragenden technisch-wirtschaftlichen Disziplinen eine besondere Bedeutung zu. Die hier zu lösenden Aufgaben beschränken sich nicht nur auf die technische Optimierung von Anlagen und Verfahren zur Energieumwandlung, sondern sie erstrecken sich weit hinein in betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Fragestellungen. Die besten Lösungen können nur in der engen Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren, Kaufleuten und Ökonomen gefunden werden. Am Beispiel eines privatfinanzierten Kraftwerksprojektes kann man deutlich machen, dass es ohne eine solche interdisziplinäre Zusammenarbeit keine vernünftige Realisierung gibt.

Das vorliegende Werk ist ein Versuch, aus der Sicht des Praktikers einen Leitfaden zu schaffen, der es auch dem Berufsanfänger gestatten soll, sich in die komplexe Materie einzuarbeiten. In seinen mehr als 27 Jahren Berufserfahrung in der Energiewirtschaft hat der Verfasser als Berater und verantwortlicher Projektleiter Erfahrungen und Kenntnisse gesammelt, die es wert sind, an eine zahlreiche Leserschaft weitergegeben zu werden.

Georg Fichtner  
Vorsitzender der Geschäftsführung

Stuttgart, im Sommer 2006

## Vorwort zur dritten Auflage

Die *Energiewirtschaft* ist weiterhin ständig im Wandel. Fünf Jahre nach Erscheinen der zweiten Auflage war eine Aktualisierung und Überarbeitung des Buches längst fällig. Nunmehr erscheint das „Praxisbuch Energiewirtschaft“ in der vollständig neu bearbeiteten dritten Auflage. Text, Tabellen, Abbildungen und die zahlreichen Anwendungsbeispiele wurden aktualisiert, und das Buch wurde durch neue Inhalte ergänzt. Dabei sind auch Anregungen von Kollegen, Kunden und Benutzern des Buches mit eingeflossen. Die Konzeption des Buches wird aber beibehalten.

*Hauptziel* ist und bleibt die Zur-Verfügung-Stellung von praxisnahem technisch/wirtschaftlichen Wissen in prägnanter Form und in der notwendigen Breite und Tiefe für die Entwicklungsphase von Energieprojekten.

Die *Vorgehensweise* bleibt wie in den vorherigen Auflagen dieselbe. Zuerst wird für jedes Kapitel eine komplette Version vom Verfasser selbst erstellt, und anschließend wird diese von Fachleuten geprüft und wo nötig überarbeitet. Diese Vorgehensweise hat sich bewährt, sie garantiert eine prägnante Form der Darstellung und fachlich gute Qualität. Das im Buch dargestellte Wissen kommt überwiegend aus aktueller Projektarbeit, in die der Autor und die Fachleute involviert waren und weniger aus Literaturrecherchen.

Alle Kapitel sind grundlegend überarbeitet und aktualisiert. Dabei wurden folgende Neuerungen aufgenommen:

*Erneuerbare Energien* kommen zunehmend weltweit zur Anwendung und ihr Beitrag für die Stromversorgung Europas wächst unaufhaltsam. Sie sind schon längst auch ein bedeutendes Marktsegment für die deutsche Industrie und für Consulting Unternehmen. Daher wurde die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien als zusätzliches, eigenes, komplett neuarbeitetes Kapitel 8 aufgenommen.

Die zahlreichen *Anwendungsbeispielen* sind für das Verständnis der Inhalte des Buches unerlässlich. Wir haben festgestellt, dass einige in der Druckversion im Buch nicht leicht nachvollziehbar sind. Deshalb werden alle Anwendungsbeispiele als Excel-Softkopie in die *Internetseite des Autors* aufgenommen, und die Leser können sie von dort herunterladen. Auf der Internetseite werden nach-und-nach auch andere Inhalte und Aktualisierungen hinzukommen. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass

es sich hier um einen freiwilligen und kostenlosen Service des Autors und seiner Kollegen handelt. Von den Nutzern wird allerdings erwartet, dass sie durch Anregungen und Hinweise zur Optimierung der Inhalte beitragen.

Tippfehler sind in der Fülle des bearbeiteten Spektrums nicht ganz zu vermeiden, ich bitte um Nachsicht.

Zu allererst gilt mein besonderer Dank der Fichtner GmbH & Co KG, Stuttgart, für die Unterstützung und für den uneingeschränkten Zugang zu allen technischen und menschlichen Ressourcen des Unternehmens während der Arbeit am Buch.

Folgenden Fichtner Kollegen möchte ich dafür danken, dass sie einen Teil ihrer Freizeit geopfert haben und wertvolle Beiträge zum Gelingen dieser dritten Auflage des Buches geliefert haben: Johannes Kretschmann (Solarthermische Kraftwerke), Markus Schüller und Sonja Koch (Windkraft), Ursula Mayr und José Luis Cruz Becerra (Photovoltaik), Dr. Nikos Efthymiou (Wasserkraft), Evelyn Sperber (KWK- und EEG-Gesetz, nun bei DLR), Martin Sielschott (Emissionshandel), Christopher Huck (Gashandel), Adriana Mejia Gomez (Anwendungsbeispiele).

Ferner möchte ich die Kollegen Christian Mayr, Dr. Achim Stuible und Nino Turek für ihre Unterstützung und Ratschläge bei zahlreichen Fragen während der Bearbeitung dankend erwähnen.

Erwähnen möchte ich im selben Zusammenhang Georg Brakmann, Gründer und langjähriger Geschäftsführer von Fichtner Solar und nun Sprecher des Deutschen CSP Verbandes.

Bernhard Rößle hat sich die Zeit genommen, das Buch gründlicher als jeder andere zu lesen und ist dabei auf einige Ungereimtheiten gestoßen. Auf meine Bitte hin hat er sich dann bereiterklärt, einige der Kapitel Korrektur zu lesen. Herzlichen Dank.

Herzlich bedanke ich mich auch bei der Fichtner- Hotline für die Mithilfe bei der Ausarbeitung der Formatvorlagen für das Buch.

Last but not least möchte ich mich bedanken bei Maggie Konstantin, meiner Ehefrau, für ihre Unterstützung bei der redaktionellen Gestaltung des Buches und auch für ihr Verständnis für die langen Abende und Wochenenden, die ihr Ehemann am Computer verbracht hat.

Stuttgart, Juni 2013

Panos Konstantin

<p><b>Anmerkung:</b> Die Internetseite ist z.Z. in Bearbeitung bei Markus Groissböck und wird ab Oktober/November 2013 zur Verfügung stehen. Link: <a href="http://pk-energie-praxiswissen.com">pk-energie-praxiswissen.com</a>.</p>
--

## Vorwort zur ersten Auflage

Die *Energiewirtschaft* ist ein Wirtschaftszweig und ein Fachgebiet. Als Fachgebiet ist die Energiewirtschaft eine Kombination aus Ökonomie und Technik und hat sich zum Ziel gesetzt, die Versorgung der Endkunden mit einer kostengünstigen, sicheren, ressourcenschonenden und umweltfreundlichen Energie zu gewährleisten. Um das zu erreichen, erforscht und analysiert die Energiewirtschaft die gesamte Kette der Energiebereitstellung von der rationellen Gewinnung, Umwandlung und Verteilung bis hin zu einer effizienten Anwendung von Energieformen unterschiedlichster Art.

Das *Hauptziel* dieses Buches ist die praxisnahe Zur-Verfügung-Stellung des technisch/wirtschaftlichen Wissens, vor allem für die Entwicklungsphase von Energieprojekten, in der notwendigen Breite und Tiefe, ohne das in den meisten Fachbüchern dargestellte umfangreiche fachspezifische Detailwissen.

*Zielgruppen* für das Buch sind Energiewirtschaftler, national und international tätige Energie-Consultants, Mitarbeiter von Ingenieurbüros, Energiedienstleistungsunternehmen, Energieversorgungsunternehmen, Industriebetrieben, Verbänden und Behörden, die in ihrer beruflichen Praxis mit energiewirtschaftlichen Aufgaben betraut werden.

*Energiewirtschaftler* können von der Ausbildung her Ingenieure oder Ökonomen, nach der Liberalisierung zunehmend auch Juristen, sein. Sie müssen aber in allen drei Gebieten soweit den Überblick haben, dass sie die technisch-wirtschaftlichen Zusammenhänge und Wechselwirkungen erkennen, bewerten und optimieren können. Sie müssen bereit und fähig sein, sich auch in das Nachbargebiet einzuarbeiten. Dies geschieht meistens in Form des training-on-the-job. Gefragt ist vor allem übergreifendes Wissen und der Blick für das Wesentliche. Fachgebietsexperten mit Spezialwissen werden vor allem während der Realisierungsphase eingeschaltet.

Der *Inhalt des Buches* ist, was die Breite der behandelten Themen betrifft, umfangreich; es wird aber versucht, die Darstellung auf das Notwendige zu begrenzen. Es umfasst 10 Kapitel: Das Thema des ersten Kapitels ist der Primärenergiemarkt und befasst sich mit der Gewinnung und Herkunft von Primärenergien sowie der Preisbildung und Entwicklung von Grenzübergangs- und Verbraucherpreisen im Wettbewerbsmarkt. Im zweiten Kapitel werden die Beschaffung von leitungsgebundenen Energien im liberalisierten Markt und die Funktionsweise der Energiebörse erläutert. In Kapitel 3 wird ein Abriss der wichtigsten rechtlichen Rahmenbedingungen in verkürzter Form und, soweit möglich, in tabellarischer Darstellung wiedergegeben, sofern diese für



die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Energieprojekten relevant sind. Kapitel 4 und 5 vermitteln das notwendige Grundwissen über Investitionsrechnung sowie physikalisch/technische Vorgänge, insbesondere für Berufseinsteiger in der Energiewirtschaft. Kapitel 6 widmet sich der Technik der Energieumwandlung und ihrer Folgen für die Umwelt sowie den Techniken zur Reduzierung von Emissionen. In Kapitel 7 und 8 werden Kraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht behandelt. Kapitel 9 befasst sich mit dem Energietransport und der Energieverteilung sowie deren Kostenstrukturen und Kapitel 10 mit der Abwicklung von Energieprojekten.

Die Energiewirtschaft hat die Landesgrenzen schon längst überschritten und ist zu einem globalen Business geworden. Die Geschäftssprache ist dabei Englisch, weswegen die wichtigsten Fachbegriffe im Buch auch in englischer Sprache angegeben werden (*kursiv in Klammern*).

Mein besonderer Dank gilt meinem Arbeitgeber, Fichtner GmbH & Co KG, Stuttgart, für die Unterstützung und für den uneingeschränkten Zugang zu allen technischen und menschlichen Ressourcen des Unternehmens während der Arbeit am Buch.

Mein Dank gebührt den fünf Gutachtern, Prof. Rainer F. Elsässer, Dr. Ing. Friedrich-Werner Möllenkamp, Dipl.-Ing. Jürgen Naukamm, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Tietz und Dipl.-Ing, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Arno Wilke, die einen ersten Entwurf des Buches begutachtet und mich ermutigt haben, an dem komplexen Thema der Energiewirtschaft weiterzuarbeiten. Herrn Wilke möchte ich zusätzlich auch für seine Unterstützung und seine zahlreichen Anregungen während der Arbeit am Buch danken.

Beim Verfassen des Inhalts wurde für jeden Abschnitt zuerst ein Entwurf vom Autor selbst erstellt, und anschließend wurde dieser von Fachleuten geprüft und ggf. überarbeitet. In diesem Zusammenhang möchte ich stellvertretend folgenden derzeitigen und früheren Fichtner-Kollegen für ihre Beiträge danken: Georg Brakmann, Dr. Sigurdur Dagbjartsson, Bruno Fey, Birgit Jahraus, Norbert Krebs, Johannes Laubach, Tobias Metzger, Wolfgang Schröder, Andreas Siegel, Dr. Achim Stuible, Nino Turek, Andreas Vondung, Hans-Friedrich Wülbeck.

Herzlich bedanke ich mich auch bei meinem früheren Kollegen Volker Döringer für seine kritische Durchsicht und redaktionelle Überarbeitung.

Kommentare zum Inhalt bzw. Anregungen für eine Verbesserung der Thematik werden vom Autor dankend entgegengenommen und bei späteren Ausgaben berücksichtigt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Der Primärenergiemarkt .....</b>	<b>1</b>
1.1 Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	1
1.2 Energieformen.....	2
1.2.1 Klassifizierung der Energieformen .....	2
1.2.2 Maß- und Handelseinheiten für Energie .....	3
1.3 Struktur des Energieverbrauchs in Deutschland.....	5
1.3.1 Primärenergieverbrauch .....	5
1.3.2 Endenergieverbrauch .....	7
1.3.3 Energieträgereinsatz zur Stromerzeugung .....	9
1.3.4 Beitrag erneuerbarer Energien zur Energiebereitstellung ....	10
1.4 Herkunft u. Preisentwicklung der Primärenergieträger.....	11
1.4.1 Herkunft und Grenzübergangspreise von Rohöl.....	11
1.4.2 Herkunft und Grenzübergangspreise von Steinkohle.....	15
1.4.3 Herkunft und Grenzübergangspreise von Erdgas.....	20
1.4.4 Herkunft und Preise von Kernbrennstoff.....	21
1.5 Preisentwicklung von Primärenergien im Vergleich.....	30
1.6 Entwicklung der Brennstoffverbraucherpreise.....	32
1.6.1 Preise von Kraftwerkskohle .....	32
1.6.2 Preise von Heizöl .....	33
1.6.3 Preise von Erdgas.....	35
1.6.4 Preisrelationen der Hauptenergieträger zum Rohöl .....	36
1.7 Schlussfolgerungen .....	38
1.7.1 Lehren aus der Vergangenheit .....	38
1.7.2 Das Prinzip der Preisanlegbarkeit.....	38
1.7.3 Preisansätze bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen.....	40
Literaturverzeichnis .....	42
<b>2. Beschaffung leitungsgebundener Energien .....</b>	<b>45</b>
2.1 Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	45
2.2 Merkmale eines liberalisierten Energiemarktes .....	45
2.2.1 Historischer Überblick und Mindestanforderungen.....	45
2.2.2 Marktteilnehmer.....	46
2.2.3 Börsenhandel, Funktionsweise und Produkte .....	47

2.3	Die Energiebörse „European Energy Exchange EEX“ .....	48
2.3.1	Stromhandel an der EEX.....	50
2.3.2	Erdgashandel an der EEX .....	56
2.3.3	Handel mit Emissionsberechtigungen an der EEX .....	58
2.3.4	OTC-Handel.....	59
2.3.5	Clearing.....	60
2.4	Strombeschaffung.....	60
2.4.1	Vertragliche Ausgestaltung.....	60
2.4.2	Zusammensetzung der Stromverbraucherpreise .....	63
2.4.3	Strombeschaffung mit Portfoliomanagement .....	65
2.4.4	Strombezug mit Vollversorgungsvertrag .....	67
2.4.5	Der klassische Stromlieferungsvertrag .....	68
2.5	Gasbeschaffung .....	72
2.5.1	Historischer Überblick – Gas-zu-Gas-Wettbewerb .....	72
2.5.2	Vertragliche Ausgestaltung.....	73
2.5.3	Zusammensetzung der Gasverbraucherpreise.....	74
2.5.4	Gaslieferungsverträge .....	76
2.5.5	Der klassische Vollversorgungsvertrag.....	77
2.6	Beschaffung von Fernwärme .....	80
	Literaturverzeichnis .....	81
<b>3.</b>	<b>Energierrechtliche Rahmenbedingungen.....</b>	<b>83</b>
3.1	Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	83
3.2	Definitionen und Überblick.....	84
3.2.1	EU-Recht.....	84
3.2.2	Deutsches Recht.....	85
3.2.3	Internationale Abkommen.....	86
3.3	Der deutsche energierechtliche Rahmen .....	86
3.3.1	Energiewirtschaftsrecht.....	86
3.3.2	Energiesteuergesetze.....	91
3.3.3	Gesetze zur Kraft-Wärme-Kopplung .....	98
3.3.4	Gesetze zur Förderung erneuerbarer Energien.....	107
3.3.5	Konzessionsabgabenverordnung.....	124
3.4	Klimaschutzrechtliche Rahmenbedingungen .....	125
3.4.1	Internationale Klimaschutzabkommen.....	125
3.4.2	Das EU-Emissionshandelssystem - EU ETS .....	132
3.4.3	Die dritte Handelsperiode 2013-2020 .....	136
3.4.4	Berechnungsgrundlagen, Rechenbeispiele und Analysen..	143
	Literaturverzeichnis .....	153
<b>4.</b>	<b>Investitionsrechnung in der Energiewirtschaft .....</b>	<b>155</b>

---

4.1	Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	155
4.2	Finanzmathematische Grundlagen .....	156
4.2.1	Der Zeitwert des Geldes, Aufzinsen, Abzinsen, Barwert ..	156
4.2.2	Zinssatz und Inflation.....	157
4.2.3	Realer Zinssatz.....	159
4.2.4	Effektiver Zinssatz .....	161
4.2.5	Ertragsteuern .....	161
4.2.6	Kalkulatorischer Zinssatz.....	163
4.3	Zahlungsreihen .....	165
4.3.1	Aufbau von Zahlungsreihen.....	165
4.3.2	Anwendungsfälle und Beispiele.....	169
4.4	Investitionsrechnungsmethoden .....	173
4.4.1	Methodische Vorgehensweise.....	173
4.4.2	Die Kapitalwertmethode .....	174
4.4.3	Durchschnittliche diskontierte Stromgestehungskosten.....	177
4.4.4	Die interne Zinssatzmethode.....	179
4.4.5	Die Annuitätenmethode .....	182
4.4.6	Amortisationsrechnung – Payback Periode .....	185
4.4.7	Rentabilitätsrechnung.....	187
4.5	Planerfolgsrechnungsmodelle .....	188
4.6	Randbedingungen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen .....	190
4.6.1	Begriffsfestlegungen .....	190
4.6.2	Kostenarten bei Energieprojekten .....	191
4.6.3	Randbedingungen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen .....	193
	Literaturverzeichnis .....	195
<b>5.</b>	<b>Physikalisch-technisches Grundwissen.....</b>	<b>197</b>
5.1	Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	197
5.2	Das internationale Einheitensystem .....	198
5.2.1	SI-Einheiten .....	198
5.2.2	Regeln für die Schreibweise von Größen und Einheiten ...	201
5.2.3	Der richtige Umgang mit Einheiten in Formeln.....	202
5.3	Basiswissen Thermodynamik.....	203
5.3.1	Allgemeine Definitionen.....	203
5.3.2	Thermodynamik der Gase und Gasgemische.....	212
5.3.3	Wasserdampfthermodynamik .....	218
5.3.4	Brennstoffkennwerte .....	221
5.3.5	Verbrennungsrechnung .....	224
5.3.6	Kreisprozesse .....	232
5.4	Basiswissen Elektrotechnik.....	235
5.4.1	Stromarten und Stromkreise.....	235

5.4.2	Drehstrommaschinen .....	245
	Literaturverzeichnis .....	253
<b>6.</b>	<b>Energieumwandlung und Emissionen .....</b>	<b>255</b>
6.1	Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	255
6.2	Energieumwandlungsanlagen.....	256
6.2.1	Typen von Energieumwandlungsanlagen .....	256
6.2.2	Bauarten von Industrie-Dampferzeugern.....	256
6.2.3	Bauarten von Kraftwerk-Dampferzeugern.....	260
6.2.4	Arten von Feuerungen.....	262
6.3	Luftverunreinigende Schadstoffemissionen .....	264
6.3.1	Arten von Emissionen.....	264
6.3.2	Emissionsgrenzwerte .....	265
6.4	Emissionsminderungsmaßnahmen .....	266
6.4.1	Primärmaßnahmen zur Emissionsreduzierung.....	266
6.4.2	Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung .....	268
6.5	Verfahren zur Reduzierung von CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	273
6.5.1	Hintergrund und Zielsetzung .....	273
6.5.2	Verfahren zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung.....	274
6.5.3	CO <sub>2</sub> -Transport .....	280
6.5.4	CO <sub>2</sub> -Speicherung .....	281
6.5.5	Vergleich der Verfahren, Energieeffizienz und Kosten.....	281
	Literaturverzeichnis .....	284
<b>7.</b>	<b>Kraftwerke, Technik und Kosten.....</b>	<b>285</b>
7.1	Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	285
7.2	Begriffsdefinitionen und Kennzahlen .....	286
7.2.1	Kraftwerkstypen.....	286
7.2.2	Definition der verwendeten Kennzahlen und Begriffe .....	287
7.3	Fossilthermische Kraftwerke.....	290
7.3.1	Dampfkraftwerke .....	290
7.3.2	Gasturbinenkraftwerke.....	299
7.3.3	Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke .....	303
7.3.4	Verbrennungsmotor-Kraftwerke .....	305
7.3.5	Stromgestehungskosten fossilthermischer Kraftwerke .....	305
7.4	Kernkraftwerke.....	313
7.4.1	Typen und Funktionsweise von Kernreaktoren .....	313
7.4.2	Kernenergieausstieg oder Ausbau.....	314
7.4.3	Der European Pressurized Reactor EPR .....	315
7.4.4	Stilllegung von Kernenergieanlagen .....	316
7.4.5	Stromgestehungskosten von Kernkraftwerken .....	318

Literaturverzeichnis ..... 321

**8. Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien ..... 323**

8.1 Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen ..... 323

8.2 Wasserkraftwerke ..... 324

    8.2.1 Physikalische Grundlagen ..... 324

    8.2.2 Typen von Wasserkraftwerken ..... 325

    8.2.3 Bauarten von Wasserturbinen ..... 327

8.3 Solarstrom-Technologieübersicht ..... 329

    8.3.1 Das Energieangebot der Sonne ..... 329

    8.3.2 Stand der Technologie von solarthermischen Kraftwerken 331

8.4 Kraftwerke mit Parabolrinnen Technologie ..... 335

    8.4.1 Historischer Rückblick ..... 335

    8.4.2 Technisches Konzept ..... 337

    8.4.3 Das Solarfeld ..... 338

    8.4.4 Der Solarkollektor ..... 340

    8.4.5 Das HTF-System ..... 341

    8.4.6 Der Wärmespeicher ..... 343

    8.4.7 Der Solarkraftwerksblock ..... 344

    8.4.8 Kommerzielle Parabolrinnen Anlagen in Betrieb ..... 345

8.5 Integrierte Parabolrinnen Solar-GuD-Kraftwerke ..... 346

    8.5.1 Technisches Konzept ..... 346

    8.5.2 Das Parabolrinnen ISCC-Kraftwerk ..... 346

    8.5.3 Parabolrinnen ISCC im kommerziellen Betrieb ..... 347

8.6 Kraftwerke mit Fresnel-Technologie ..... 348

    8.6.1 Technisches Konzept ..... 348

    8.6.2 Das Solarfeld ..... 349

    8.6.3 Der Fresnel Kollektor ..... 351

    8.6.4 Absorbersystem ..... 351

    8.6.5 Fresnel-Anlagen kommerziellen Maßstabs in Betrieb ..... 352

8.7 Kraftwerke mit Solarturm-Technologie ..... 353

    8.7.1 Technisches Konzept ..... 353

    8.7.2 Das Solarfeld ..... 354

    8.7.3 Die Heliostate ..... 354

    8.7.4 Der Receiver ..... 355

    8.7.5 Thermischer Energiespeicher und Kraftwerksblock ..... 355

    8.7.6 Solarturm-Anlagen kommerziellen Maßstabs in Betrieb... 357

8.8 Die Parabolschüssel -Technologie ..... 357

8.9 Photovoltaik Anlagen ..... 358

    8.9.1 Physikalisch-technische Grundlagen ..... 358

    8.9.2 Aufbau und Funktionsweise von Solarzellen ..... 359

8.9.3	Typen von Solarzellen .....	360
8.9.4	PV-Module – Aufbau, Funktionsweise, Kenngrößen.....	362
8.9.5	Aufbau von Photovoltaik Anlagen.....	365
8.9.6	Kenngrößen von PV-Anlagen .....	366
8.9.7	Kommerzielle PV Anlagen mit Kraftwerksgröße in Betrieb.....	368
8.10	Windkraftanlagen .....	368
8.10.1	Physikalische Grundlagen .....	368
8.10.2	Windpotential .....	369
8.10.3	Anlagentechnik.....	372
8.10.4	Kenngrößen von Windkraftanlagen .....	374
8.10.5	Klassifizierung von Windkraftanlagen.....	375
8.10.6	Ermittlung des Energieertrages für eine WKA .....	377
8.10.7	Ermittlung des Energieertrages für Windparks .....	382
8.10.8	Ausbauperspektiven der Windenergie.....	383
8.11	Investitionen und Stromgestehungskosten .....	384
8.11.1	Technisch-wirtschaftliche Randbedingungen .....	384
8.11.2	Wasserkraftwerke.....	390
8.11.3	Parabollinnen-Solkraftwerke.....	392
8.11.4	Solarturm Kraftwerke.....	394
8.11.5	Photovoltaik-Kraftwerke .....	395
8.11.6	Windkraftanlagen .....	397
8.11.6	Niedrigzinsszenario für PV und Wind.....	401
	Literaturverzeichnis .....	404
<b>9.</b>	<b>Kraft-Wärme-Kopplung, Technik, Kostenaufteilung.....</b>	<b>407</b>
9.1	Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen .....	407
9.2	Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung .....	408
9.2.1	Bauarten von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen .....	410
9.2.2	Aufbau und Fahrweise von Heizkraftwerken .....	410
9.2.3	Anwendungsmöglichkeiten und Betreiber.....	412
9.3	Heizkraftwerke .....	412
9.3.1	Verbrennungsmotor-Blockheizkraftwerke.....	412
9.3.2	Gasturbinen-Heizkraftwerke.....	415
9.3.3	Dampfturbinen-Heizkraftwerke .....	417
9.3.4	Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerke.....	420
9.3.5	Wärmeauskopplung aus Großkraftwerken.....	421
9.4	Kennzahlen der gekoppelten Energieerzeugung .....	422
9.4.1	Thermodynamisches Modell KWK- und Kond.-Anlagen .....	422
9.4.2	Wirkungsgrad und Energienutzungsgrad.....	424
9.4.3	Die Stromkennzahl.....	425
9.4.4	Die Stromverlust-Kennziffer.....	427

9.4.5	Äquivalente Kondensationsleistung.....	428
9.4.6	Beziehungen zwischen den Kennzahlen .....	428
9.4.7	Richtwerte für Kennzahlen von KWK-Anlagen .....	430
9.4.8	Auflistung verwendeter Symbole bei den Kennzahlen .....	435
9.5	Kostenaufteilungsverfahren .....	436
9.5.1	Das Stromäquivalenzverfahren (Arbeitswertverfahren) ....	436
9.5.2	Das Exergie-Verfahren .....	441
9.5.3	Das kalorische Verfahren.....	445
9.5.4	Das Restwertverfahren.....	446
9.6	Wahl des Kostenaufteilungsverfahrens .....	450
	Literaturverzeichnis .....	452
<b>10.</b>	<b>Energietransport und -verteilung.....</b>	<b>453</b>
10.1	Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen.....	453
10.2	Stromübertragung und -verteilung.....	454
10.2.1	Technischer Aufbau der Stromnetze .....	454
10.2.2	Systemkomponenten von elektrischen Netzen .....	457
10.2.3	Das Deutsche und das Europäische Verbundnetz .....	462
10.3	Netzzugang und Netznutzung bei Stromnetzen.....	464
10.3.1	Pflichten der Netzbetreiber.....	464
10.3.2	Grundlagen der Netznutzung - Bilanzkreise.....	465
10.3.3	Fahrpläne und Standardlastprofile.....	465
10.3.4	Regel- und Ausgleichsenergie.....	468
10.3.5	Ausschreibung und Abrechnung von Regelenergie.....	471
10.3.6	Genehmigung der NNE - Anreizregulierung .....	472
10.3.7	Bestimmung der Netznutzungsentgelte .....	473
10.4	Erdgastransport und -verteilung .....	477
10.4.1	Technischer Aufbau von Erdgasnetzen .....	477
10.4.2	Das deutsche und europäische Erdgas-Verbundnetz.....	480
10.4.3	Auslegung und Betrieb von Erdgasnetzen .....	481
10.5	Netzzugang und Netznutzung bei Gasnetzen .....	486
10.5.1	Grundlagen des Netzzugangs.....	487
10.5.2	Marktgebiete - virtueller Handelspunkt.....	488
10.5.3	Gasqualität-Übergreifender Erdgashandel .....	489
10.5.4	Netzmanagement.....	489
10.5.5	Buchung von Leistungskapazitäten.....	489
10.5.6	Handel von Leistungskapazitäten.....	490
10.5.7	Buchung von Speicherkapazitäten.....	491
10.5.8	Handel von Speicherkapazitäten.....	492
10.5.9	Kapazitätsentgelte - Entgeltgenehmigung .....	492
10.5.10	Bilanzkreismanagement.....	492



10.5.11	Ausgleichs- und Regelenergie.....	493
10.5.12	Die Kooperationsvereinbarung.....	495
10.6	Fernwärmeverteilung.....	495
10.6.1	Technischer Aufbau von Fernwärmenetzen.....	495
10.6.2	Grundbegriffe der Fernwärmeversorgung.....	497
10.6.3	Ausgewählte Merkmale der Fernwärmeversorgung.....	497
10.6.4	Auslegung und Betrieb von Fernwärmenetzen.....	498
10.6.5	Systemkomponenten von Fernwärmenetzen.....	501
	Literaturverzeichnis.....	508
<b>11.</b>	<b>Abwicklung von Energieprojekten.....</b>	<b>511</b>
11.1	Phasen der Projektabwicklung.....	511
11.1.1	Projektstart.....	512
11.1.2	Planung und Vergabe.....	514
11.1.3	Bau und Inbetriebnahme.....	518
11.2	Betrieb der Anlage.....	518
	Literaturverzeichnis.....	520
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>521</b>
	<b>Sachverzeichnis.....</b>	<b>527</b>
	<b>Glossar Deutsch-Englisch.....</b>	<b>535</b>

# 1. Der Primärenergiemarkt

## 1.1 Inhalt, Zielsetzung und Schlussfolgerungen

Gegenstand und Ziel dieses Kapitels ist, die Entwicklung des Energieverbrauchs und die Kostenentwicklung der verschiedenen Primärenergiearten (Rohöl, Steinkohle, Kernenergie, Erdgas) in einem Zeitraum von 1970 bis heute zu analysieren. Davon ausgehend Schlussfolgerungen abzuleiten, welche insbesondere für Preisansätze in Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen benötigt werden. Die aus diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Der Verbrauch insbesondere an Primärenergien hat in Deutschland nach 2000 beträchtlich abgenommen – Abb. 1-3 und Abb. 1-4. Eine Kopplung an das Wirtschaftswachstum ist seitdem nicht mehr vorhanden.

Die Marktpreise von Rohöl und der anderen Primärenergien sind starken Schwankungen unterworfen – Abb. 1-13. Sie reagieren besonders empfindlich auf geopolitische Ereignisse wie Krisen und Unruhen in den Förderländern, Naturkatastrophen, sowie auf Meldungen und Gerüchte auf dem Markt, die Knappheitsängste bei den Verbrauchern verursachen.

Erdöl übt nach wie vor eine Preisleitfunktion auf dem Energiemarkt aus. Aus der indextierten Darstellung – Abb. 1-27 – ist deutlich erkennbar, dass die Preise aller Primärenergien der Preisentwicklung des Preisführers Erdöl mit einer kurzen Verzögerung folgen.

Die Preisbildung von Energieträgern, die im Wettbewerb zueinander stehen, erfolgt nach dem Anlegbarkeitsprinzip – Abb. 1-32.

Der Importkohlepreis ist außerdem stark abhängig von den Überseefrachtraten, die abhängig von der Konjunktur stark schwanken – Abb. 1-17.

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Vergangenheit kann man schließen, dass mittel- und längerfristige Preisprognosen für Primärenergien praktisch sinnlos sind. Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sollte man eher ihren Einfluss mit Sensitivitätsanalysen untersuchen und dabei ihre gegenseitige Abhängigkeit berücksichtigen – siehe dazu Abschnitt 1.7.

## 1.2 Energieformen

### 1.2.1 Klassifizierung der Energieformen

Energie ist in chemischer Form in Brennstoffen (Kohle, Heizöl) enthalten oder in *Energieträgern* (Dampf, Heißwasser) gespeichert. Die Einheit für Energie ist 1 J (Joule). Die Energieformen werden „physikalisch“ oder nach der „Energieumwandlung und -anwendung“ klassifiziert. Diese Hauptformen werden in verschiedene Unterformen unterteilt. Eine Klassifizierung der Energieformen im Rahmen der Energieumwandlung und -anwendung ist in der Abb. 1-1 zu ersehen.

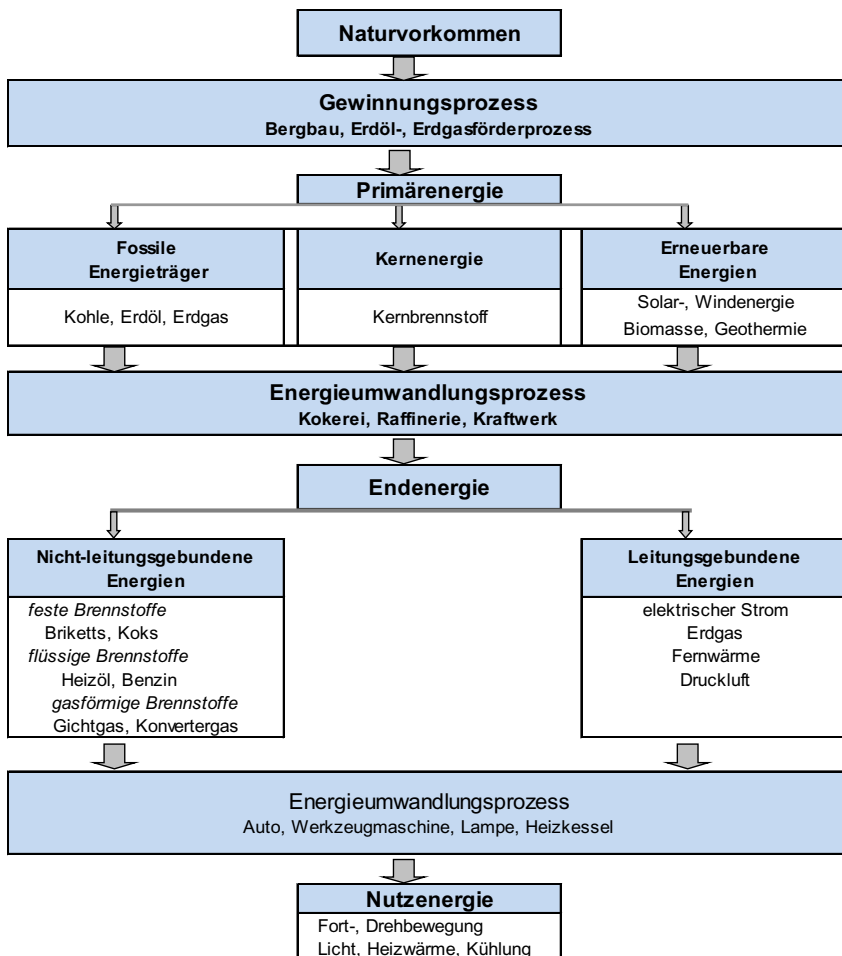


Abb. 1-1: Energieformen, nach Umwandlung und Anwendung

Physikalisch wird nach folgenden Energieformen unterschieden:

- Mechanische Energie; sie kommt als kinetische (Bewegungsenergie) oder potenzielle (Höhenenergie) Energie vor
- Thermische Energie
- Chemische Energie, z.B. die in Brennstoffen enthaltene Energie
- Strahlungsenergie
- Kernenergie

Im Rahmen der Energieumwandlung und -anwendung unterscheidet man drei Hauptformen von Energie:

- Primärenergien sind Naturvorkommen, die noch keinerlei Umwandlung unterzogen wurden
- Endenergien werden in einem Energieumwandlungsprozess (Raffinerie, Kraftwerk) aus Primärenergie gewonnen
- Nutzenergie ist die Energie, die nach der letzten Umwandlung in den Geräten des Endverbrauchers zur Verfügung steht.

### 1.2.2 Maß- und Handelseinheiten für Energie

Die offizielle Einheit für Energie nach ISO-Standard<sup>1</sup> ist 1 Joule "J" (bzw. die Vielfachen von 1 J: kJ=10<sup>3</sup> J, MJ=10<sup>6</sup>, GJ=10<sup>9</sup>, TJ=10<sup>12</sup>). Auf dem Markt werden aber Energien in verschiedenen Natur- oder Handelseinheiten (Tonne, Barrel, Hektoliter) verkauft. Die meisten dieser Einheiten sind historischen Ursprungs. Zu unterscheiden ist unbedingt zwischen Masse-, Volumen- und Energieeinheiten. Beim Kauf von Energie wird eigentlich nicht die Masse oder das Volumen sondern der darin enthaltene Energiegehalt gekauft.

*Steinkohle (hard coal)* wird als Masse in Tonnen verkauft. Die verschiedenen Kohlesorten haben aber nicht den gleichen Energiegehalt. Um ein vergleichbares Maß zu haben, wurde ursprünglich als Energieeinheit für Kohle die **Stein Kohle Einheit** "1 t SKE" (*englisch: „tce“ ton of coal equivalent*) eingeführt. Das ist der Energiegehalt von hochwertiger Steinkohle mit 7.000 kcal/kg bzw. 7 Gcal/t. Ein kcal ist eine alte Energieeinheit und entspricht 4,187 kJ.

*Rohöl (crude oil)* wird in „barrel“ gehandelt. Öl wurde ursprünglich in Fässern (*englisch: barrel*) verkauft. Ein barrel ist eine Volumeneinheit und

---

<sup>1</sup> Als Einheitensystem für die physikalischen Größen ist in den meisten Ländern das „Standard Internationale Einheitensystem nach [ISO 1000], abgekürzt SI-Maßsystem in Gebrauch. Siehe Abschnitt 5.1 "Das internationale Einheitensystem".