

Energie in Naturwissenschaft, Technik,  
Wirtschaft und Gesellschaft

Wolfgang Osterhage

# Chancen und Grenzen der Energieverwertung

Physikalische Grundlagen und Technologien

---

# **Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft**

Die Frage nach der Energieversorgung ist entscheidend dafür, wie sich die Zukunft gestaltet – sowohl was technische Entwicklungsarbeit betrifft als auch wirtschaftliche Konzepte oder einen gesellschaftlichen Wandel. Je nach räumlicher Betrachtungsebene (global, national oder regional) stehen unterschiedliche Fragestellungen, Sichtweisen oder Herausforderungen im Vordergrund.

Die Titel dieser Buchreihe wollen somit auf neue Perspektiven aufmerksam machen, und in interdisziplinärer Weise Facetten rund um die Energieerzeugung, -nutzung, -verteilung, -wirtschaft und Wirtschaftlichkeit sowie zur Bedeutung für Umwelt und Gesellschaft beleuchten.

Um dies zu erreichen, bearbeiten in der Reihe *Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft* Autoren aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen zusammen ein Thema und entzünden gemeinsam eine Diskussion zu energiespezifischen Fragestellungen aus mehreren Blickwinkeln.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/14344>

---

Wolfgang Osterhage

# Chancen und Grenzen der Energieverwertung

Physikalische Grundlagen und  
Technologien

Wolfgang Osterhage  
Wachtberg, Nordrhein-Westfalen, Deutschland

ISSN 2366-6242                      ISSN 2366-6250 (electronic)  
Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft  
ISBN 978-3-658-23901-5              ISBN 978-3-658-23902-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23902-2>

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 Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

## Vorwort

Das Wort von der Energiewende ist in aller Munde und beschäftigt die Medien seit 2011, ebenso der Begriff der „erneuerbaren“ Energien. Vor diesem Hintergrund sollen in diesem Buch zum einen wichtige physikalische Grundlagen in einem komprimierten Überblick zusammengefasst werden. Zum anderen wird gezeigt, dass sich jegliche Form der Energiebereitstellung bzw. -umwandlung letztendlich auf atom- und kernphysikalische Ursachen zurückführen lässt. Des Weiteren werden die heute bekannten gängigen Energieumwandlungstechnologien als ein komprimiertes Kompendium zusammengefasst. Nacheinander werden behandelt: die klassischen Dampfkraftanlagen, die Kernenergie, Solarenergie, Windkraft, Biomasse und Biogas, Erdwärme und Wasserkraft sowie Gezeiten- und Regenkraftwerke und KWK-Anlagen. Außerdem gibt es einen Beitrag über Speichertechnologien. Schließlich erfolgt ein Ausblick auf Fusion und Brennstoffzelle. Der Appendix gibt eine Zusammenfassung des gegenwärtigen Diskussionsstands zum Climate Engineering, das ja bekanntlich im Zusammenhang steht mit den Auswirkungen von Energieumwandlungstechnologien.

Die Inhalte basieren einerseits auf einer Vorlesung im Wintersemester 2011/2012 an der Goethe Universität Frankfurt, andererseits sind selbige bereits teilweise veröffentlicht worden in der Reihe „Essentials“ unter:

- *Energie ist nicht erneuerbar*, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2014
- *Ursprünge aller Energiequellen*, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2015
- *Die Energiewende: Potenziale bei der Energiegewinnung*, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2015
- *Climate Engineering*, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2015

Die physikalischen Grundlagen finden sich auch bei Osterhage, *Studium Generale Physik*, Springer, Heidelberg, 2013, bzw. *Eine Rundreise durch die Physik*, z. Zt. in Produktion bei Springer, Heidelberg. Die Konzepte über Exergie und Anergie sind sehr schön dargestellt bei Baehr, *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*, Springer, Heidelberg, 2005. Wer mehr über die aktuelle Energiediskussion erfahren möchte, dem empfehle ich Aichele, *Smart Energy*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012

sowie M. Wietschel et al. (Hrsg.), *Energietechnologien der Zukunft*, 2015, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Dank gebührt der freundlichen Unterstützung bei der Realisierung dieses Projekts durch Daniel Fröhlich und seinem Team.

Wachtberg, im November 2018

Wolfgang Osterhage

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Energiebilanzen</b> .....	7
2.1	Energievorräte .....	7
2.2	Grundlagen der Thermodynamik .....	9
2.2.1	Einleitung .....	9
2.2.2	Energie .....	9
2.2.3	Temperatur .....	11
2.2.3.1	I. Hauptsatz der Thermodynamik .....	14
2.2.3.2	II. Hauptsatz der Thermodynamik .....	15
2.2.4	Exergie und Anergie .....	19
2.2.5	Energiebilanz allgemein .....	22
2.2.5.1	Energiebilanzen vollständig .....	22
<b>3</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Energieumwandlung</b> .....	25
3.1	Elektromagnetismus .....	25
3.1.1	Einleitung .....	25
3.1.2	Ladung .....	25
3.1.3	Strom und Spannung .....	27
3.1.4	Gleichstrom .....	28
3.1.5	Magnetismus .....	31
3.1.6	Elektromagnetismus .....	31
3.1.7	Wechselstrom .....	34
3.1.8	Maxwellsche Gleichungen .....	36
3.1.9	Transformator .....	37
3.2	Strömungsmechanik .....	38
3.2.1	Einleitung .....	38
3.2.2	Flüssigkeiten .....	39
3.2.2.1	Definition .....	39
3.2.2.2	Druck .....	40

	3.2.2.3	Auftrieb	41
	3.2.2.4	Strömung	41
	3.2.2.5	Bewegungsgleichungen	43
	3.2.2.6	Die Eulersche Turbinengleichung	44
3.3		Atomphysik	45
	3.3.1	Einleitung	45
	3.3.2	Der Photoeffekt	46
	3.3.2.1	Der äußere Photoeffekt	48
	3.3.2.2	Der innere Photoeffekt	49
	3.3.3	Der Compton-Effekt	50
	3.3.4	Materiewellen	53
	3.3.5	Atommodelle	54
	3.3.5.1	Frühe Atommodelle	54
	3.3.5.2	Spektren	56
	3.3.6	Quantenzahlen	58
	3.3.7	Der Atomkern	60
	3.3.7.1	Periodensystem	60
	3.3.7.2	Starke Wechselwirkung	62
	3.3.7.3	Aufbau des Atomkerns	62
	3.3.7.4	Kernmodelle	63
	3.3.7.5	Tröpfchenmodell	64
	3.3.7.6	Das optische Modell	66
	3.3.8	Radioaktivität	66
	3.3.8.1	Zerfallsgesetz	69
	3.3.9	Kernphysikalische Reaktionen	72
	3.3.9.1	Absorption	74
	3.3.9.2	Moderation	74
<b>4</b>		<b>Formen der Energiegewinnung</b>	<b>75</b>
4.1		Dampfkraftanlagen	75
	4.1.1	Einleitung	75
	4.1.2	Kohle	75
	4.1.3	Gas	76
	4.1.4	Öl	77
	4.1.5	Wärme- und Verbrennungskraftanlagen: Ursprung der Brennstoffe	77
	4.1.6	Kernenergie	78
	4.1.6.1	Charakteristika von Reaktoren	79
4.2		Solarkraftwerke	80
	4.2.1	Parabolrinnenkraftwerke	81
	4.2.2	Photovoltaik	81
	4.2.3	Solarenergie: Ursprung	82

---

4.3	Windkraft	82
4.3.1	Einleitung	82
4.3.2	Umsetzung	84
4.3.3	Windenergie: Ursprung	86
4.4	Biomasse	86
4.4.1	Verbrennungstechnologie	88
4.4.2	Der Verbrennungsprozess	89
4.4.3	Brennstoffe	91
4.4.4	Die Erzeugung von Strom und Wärme	91
4.4.5	Biomasse: Ursprung	92
4.5	Biogas	92
4.5.1	Technologische Voraussetzungen	94
4.6	Erdwärme	95
4.6.1	Einleitung	95
4.6.2	Wärmepumpensysteme	96
4.6.3	Erdwärmekraftwerke	97
4.6.4	Erdwärme: Ursprung	98
4.7	Wasserkraft	98
4.7.1	Einleitung	98
4.7.2	Speicherkraftwerke	99
4.7.3	Wasserkraft: Ursprung	100
4.8	Regenkraftwerke	100
4.8.1	Hintergrund	100
4.8.2	Konzept	100
4.9	Kraft-Wärme-Kopplung	101
4.10	Gezeitenkraftwerke	102
<b>5</b>	<b>Speichertechnologien</b>	<b>105</b>
5.1	Übertragungsverluste	105
5.1.1	Spannungsebenen	105
5.1.2	Leitungsverluste	106
5.2	Speicher	106
5.2.1	Blei-Säure-Batterien	107
5.2.2	Lithiumionenbatterien	107
5.2.3	Lithium-Schwefel-Batterien	107
5.2.4	Lithium-Luft-Batterien	107
5.2.5	Natrium-Hochtemperatur-Batterien	108
5.2.6	Redox-Flow-Batterien	108

<b>6</b>	<b>Zukunftsweisende Ansätze</b>	109
6.1	Kernfusion	109
6.1.1	Herausforderungen	110
6.1.2	Technische Fragen	111
6.1.3	Der Stellarator	111
6.2	Brennstoffzelle	113
<b>7</b>	<b>Smart Energy</b>	115
7.1	Einleitung	115
7.2	Die Smart-Energy-Vision	115
7.3	Digitale Zähler	117
7.4	Smart Grid	118
<b>8</b>	<b>Climate Engineering</b>	119
8.1	Standortbestimmung	119
8.2	Problemstellung	120
8.3	Gezielte Eingriffe in das Klimasystem	121
8.3.1	Technologien zur ursächlichen Rückführung	121
8.3.2	Technologien zur symptomatischen Kompensation des Klimawandels	121
8.3.3	Diskussionsstand	122
8.3.3.1	Folgen und Vorhersagbarkeit	123
8.3.4	Rechtsrahmen	124
8.3.4.1	Konfliktpotenzial	124
8.3.4.2	Institutionelle Einbindung	124
8.3.5	Kosten	124
8.3.6	Ansätze	125
8.4	Konkrete technologische Maßnahmen	126
8.4.1	Ausgangspunkt	126
8.4.2	Möglichkeiten der Beeinflussung	126
8.4.3	Reduktion der Einstrahlung	126
8.4.3.1	Erhöhung der Reflexion von Sonnenstrahlung	127
8.4.3.2	Erhöhung der thermischen Ausstrahlung	129
8.4.4	Stand der Technik	131
8.4.5	Nebenwirkungen	132
8.5	Physikalische Hintergrundbetrachtungen	132
8.5.1	Energiebilanzen	132
8.5.2	Chaos	132
8.5.3	Feinabstimmung	133
8.6	Zusammenführung	134
8.6.1	Irreversibilität	134
8.6.2	Argumente	135
8.6.3	Risikoanalyse	135

---

8.7	Referenzrahmen .....	136
8.8	Ethik .....	137
8.9	Schluss .....	138
	Weiterführende Literatur .....	138
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>139</b>

Bei Energieumwandlung spielen praktisch alle Disziplinen der Physik mit Ausnahme der Hochenergiephysik und der Kosmologie eine Rolle. In diesem Buch sollen zunächst die wichtigsten herausgegriffen werden, da sie für unsere weiteren Betrachtungen von besonderer Bedeutung sind. Diese Gebiete werden wir im Überblick behandeln. Folgende Spezialgebiete sind betroffen:

- Thermodynamik und Wärmeübertragung,
- Strömungsmechanik und Gasdynamik,
- Elektromagnetismus.

Wenn wir uns z. B. den Komponenten einer Wärmekraftanlage zuwenden, dann können wir folgendes Schema zugrunde legen (Abb. 1.1):

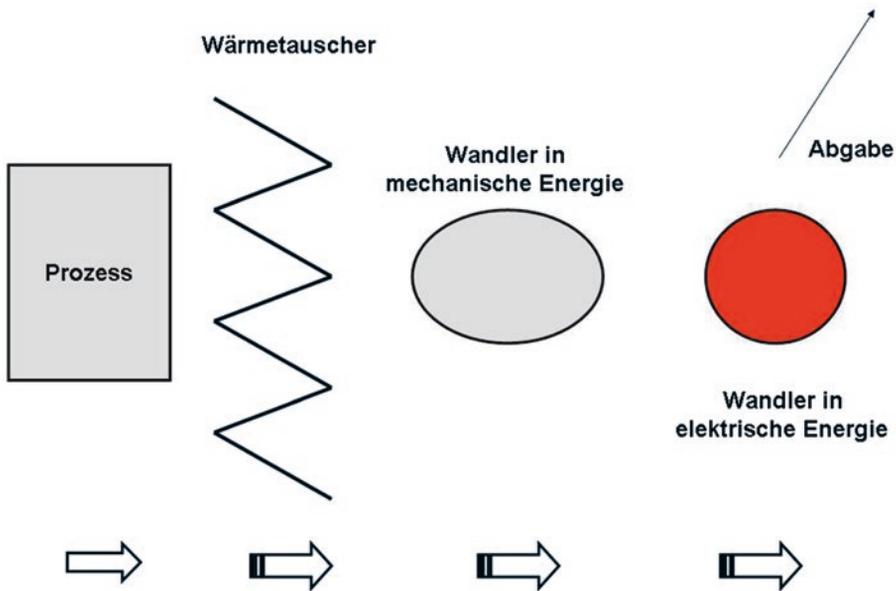
Wenn wir das simple Schema mit konkreten Inhalten füllen wollen, dann reden wir grundsätzlich über folgende Komponenten.

Der Prozess kann sein:

- Verbrennung von Kohle, Gas, Öl oder organische Stoffe,
- eine Kettenreaktion in einem Kernreaktor,
- Luftbewegung (Wind),
- Aufnahme von Solarenergie,
- Aufnahme von Erdwärme,
- Fermentierung organischer Stoffe.

Wärmetauscher können entweder die erzeugte Wärme direkt aufnehmen oder an einen Sekundärkreislauf weitergeben.

Der mechanische Wandler ist in der Regel eine Turbine, der elektrische ein Generator.



**Abb. 1.1** Komponenten der Energieumwandlung

Es gibt Prozesse, bei denen die eine oder andere Komponente entfallen kann. Dazu gehören Windkraftanlagen (kein Wärmetauscher) und Fotovoltaikanlagen (kein Wärmetauscher, kein mechanischer Wandler, kein elektrischer Wandler).

Bevor wir uns diesen Details zuwenden, werden wir noch einmal auf den endlichen Energievorrat zu sprechen kommen, der uns zur Verfügung steht. Dann werden wir uns etwas tiefer mit dem 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik sowie den Energiebilanzen auseinandersetzen, gefolgt von den wichtigsten Gesichtspunkten der Strömungslehre und des Elektromagnetismus, die beide eine wichtige Rolle in Energieanlagen spielen. Zum Schluss kommen wir noch einmal auf die Gesamtenergiebilanz unter Berücksichtigung aller Anteile zurück.

Daneben gibt es aber Urgründe, aus denen alle genannten Energieformen gespeist werden – nämlich atom- und kernphysikalische Prozesse. Wir werden das in einer Einzelfallbetrachtung in den jeweils relevanten Abschnitten nachweisen. Zum Verständnis dieser Zusammenhänge werden noch zwei weitere Überblicke über Spezialgebiete der Physik gegeben:

- Atomphysik
- Kernphysik

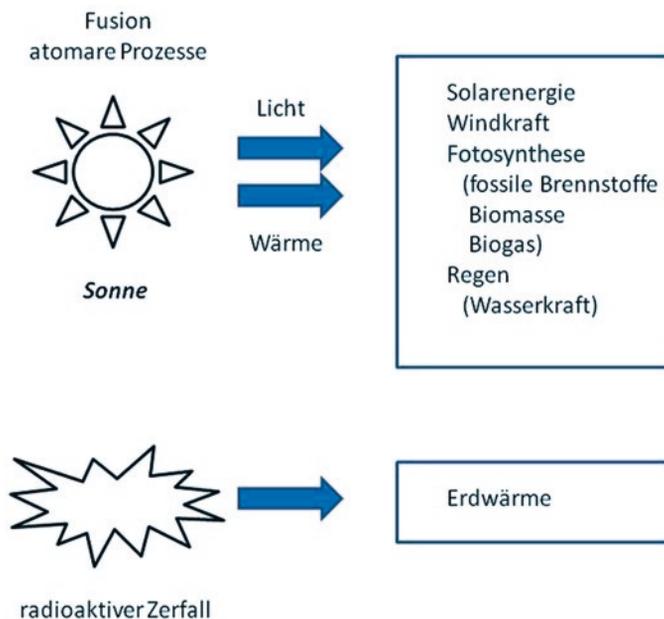
Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass wir unsere Wärme aus zwei natürlichen Quellen beziehen:

- Sonnenstrahlung
- Erdwärme

Die Sonnenstrahlung ihrerseits speist sich aus den kernphysikalischen Vorgängen im Sonneninneren, der Kernfusion. Das Sonnenlicht wiederum wird durch An- und Abregung atomphysikalischer Vorgänge auf den Elektronenschalen der Sonnenatome erzeugt. Die Erdwärme ist das Ergebnis radioaktiven Zerfalls instabiler Elemente im Erdinnern bzw. der Erdkruste.

Fossile Brennstoffe sind das Ergebnis der Umwandlung ursprünglich organischer Materie, die sich direkt aus der Fotosynthese, einem atomaren Vorgang, bzw. in der animalischen Form letztendlich auch über die Nahrungskette auf pflanzliche Voraussetzungen zurückführen lassen. Das gleiche gilt für Biomasse. Windkraft und Wasserkraft letztendlich sind das Ergebnis von Massenströmen, die klimatisch bedingt und damit auf Sonneneinstrahlung zurückzuführen sind. Bleibt lediglich die Kernenergie, die nicht auf weitere Naturvorgänge reduziert werden kann.

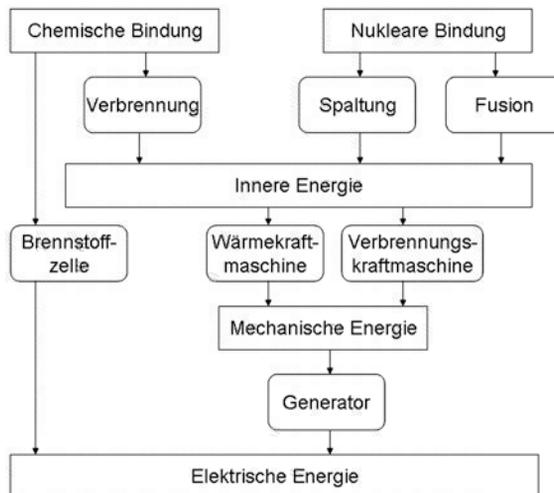
In der Abb. 1.2 sind diese Verkettungen als Übersicht dargestellt.



**Abb. 1.2** Verkettung der Energieformen

Um zu illustrieren, wie schnelllebig die Welt energiepolitischer Konzepte ist, zitiere ich aus einem Lehrbuch von 1966: „Es ist Aufgabe der Energietechnik, die zur Durchführung technischer Verfahren benötigte Exergie als mechanische Nutzarbeit oder als elektrische Energie bereitzustellen. Diese Exergie stammt aus den auf der Erde vorhandenen Exergiequellen; diese sind vor allem die fossilen und nuklearen Brennstoffe, deren chemische Bindungsenergie bzw. deren nukleare Energie in mechanische und elektrische Energie umzuwandeln ist. Weitere Exergiequellen sind die Wasserkräfte, deren potenzielle Energie ausgenutzt wird, und die kinetische Energie des Windes sowie die der Erde zugestrahlte Sonnenenergie.

Die Abb. 1.3 gibt einen Überblick über die heute bekannten Verfahren zur Umwandlung chemischer und nuklearer Energie in elektrische Energie. Wie wir wissen, besteht die chemische Energie der Brennstoffe weitgehend aus Exergie; durch reversible Prozesse könnte sie also fast vollständig in elektrische Energie verwandelt werden. Es ist bisher noch nicht gelungen, den Exergieanteil der bei Kernprozessen frei werdenden nuklearen Energie zu berechnen. Es wird jedoch vermutet, dass auch nukleare Energie weitgehend aus Exergie besteht. Daraus ergibt sich die Forderung, die Umwandlungsprozesse, die von der chemischen und nuklearen Energie zur elektrischen Energie führen, möglichst reversibel zu führen, um den hohen Exergiegehalt der Ausgangsenergien zu erhalten. Dabei werden von vornherein jene Verfahren im Vorteil sein, die möglichst direkt verlaufen, also Zwischenstufen von Energieumwandlungen und Energieübertragungen vermeiden, bei denen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen unvermeidbare Exergieverluste auftreten.



**Abb. 1.3** Umwandlungsverfahren