

Thomas Bürke,
Roland Wengenmayr (Hrsg.)

 WILEY-VCH

Erneuerbare Energie

Konzepte für die Energiewende

3. Auflage

Um neue Technikbereiche
erweitert, komplett aktualisiert!

Mit Informationen zu
aktuellen Förderprogrammen

SACHbuch





Erneuerbare Energie

*Herausgegeben von
Thomas Bührke
und Roland Wengenmayr*

***Beachten Sie bitte auch
weitere interessante Titel
zu diesem Thema***

Würfel, P.

**Physics of Solar Cells
From Basic Principles to Advanced Concepts**
2009
ISBN: 978-3-527-40857-3

Abou-Ras, D., Kirchartz, T., Rau, U. (Hrsg.)

Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells
2011
ISBN: 978-3-527-41003-3

Scheer, R., Schock, H.-W.

**Chalcogenide Photovoltaics
Physics, Technologies, and Thin Film Devices**
2011
ISBN: 978-3-527-31459-1

Stolten, D. (Hrsg.)

**Hydrogen and Fuel Cells
Fundamentals, Technologies and Applications**
2010
ISBN: 978-3-527-32711-9

Vogel, W., Kalb, H.

**Large-Scale Solar Thermal Power
Technologies, Costs and Development**
2010
ISBN: 978-3-527-40515-2

Huenges, E. (Hrsg.)

**Geothermal Energy Systems
Exploration, Development, and Utilization**
2010
ISBN: 978-3-527-40831-3

Keyhani, A., Marwali, M. N., Dai, M.

**Integration of Green and Renewable Energy in Electric
Power Systems**
2010
ISBN: 978-0-470-18776-0

Olah, G. A., Goepfert, A., Prakash, G. K. S.

Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy
2010
ISBN: 978-3-527-32422-4

Erneuerbare Energie

Konzepte für die Energiewende

*Herausgegeben von
Thomas Bürke und Roland Wengenmayr*

Dritte, aktualisierte und erweiterte Auflage



WILEY-
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Herausgeber

Dr. Thomas Bührke
Wiesenblättchen 12
68723 Schwetzingen
Thomas@Buehrke.com

Roland Wengenmayr
Konrad-Glatt-Str. 17
65929 Frankfurt
roland@roland-wengenmayr.de

3. aktualis. u. erg. Auflage 2011

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2012 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. 12,
69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Satz TypoDesign Hecker GmbH, Leimen
Druck und Bindung betz-druck GmbH, Darmstadt
Umschlaggestaltung Bluesea Design

Printed in the Federal Republic of Germany

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISBN 978-3-527-41108-5

Vorwort

Es ist heute weitgehend anerkannt, dass der Mensch die Zusammensetzung der Erdatmosphäre signifikant verändert und damit die Gefahr eines katastrophalen Klimawandels heraufbeschwört. Kritisch sind vor allem die Konzentrationsänderungen von Kohlendioxid (CO₂), Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄). Die CO₂-Konzentration liegt heute bereits über 380 ppm (ppm: parts per million) und damit weit über der maximalen CO₂-Konzentration von etwa 290 ppm, die die Erde in den vergangenen 800 000 Jahre erlebte. Der jüngste Bericht des Weltklimarats, des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), und des COP-16-Treffens in Cancun im Dezember 2010 zeigen, dass die Welt beginnt, die technologische und politische Herausforderung anzunehmen: Es wird notwendig sein, die Emission dieser Treibhausgase in den kommenden Jahrzehnten um 80 % zu reduzieren. Die Kernkraftkatastrophe in Fukushima am 11. März 2011 hat drastisch gezeigt, dass Kernkraft nicht der richtige Weg zur CO₂-freien Stromerzeugung ist, und Deutschland hat in dieser Hinsicht eine weltweit beachtete Kehrtwendung gemacht. Wir werden sicher in den kommenden Jahren der Vorreiter in der globalen Transformation unseres Energiesystems in Richtung auf hundert Prozent erneuerbare Quellen bleiben.

Dieses ambitionierte Ziel kann nur durch raschen Fortschritt auf zwei Gebieten erreicht werden: eine schnell wachsende Energieproduktion aus erneuerbaren Quellen und eine gesteigerte Energieeffizienz – besonders bei Gebäuden, die einen großen Anteil unseres gesamten Energieverbrauchs verursachen. Leider werden diese beiden konkreten, positiven Ziele bei den internationalen Klimaverhandlungen immer noch vernachlässigt.

Dieses Buch präsentiert eine umfassende Behandlung dieser kritischen Zielvorgaben. Die 29 Kapitel der stark erweiterten dritten Auflage sind von Experten auf ihren je-

weiligen Gebieten geschrieben und decken die wichtigsten Technologien ab, die notwendig sind, um diese zwei Ziele zu erreichen. Allgemein interessierten Lesern bietet es einen exzellenten, präzisen Überblick über erneuerbare Energien und alternative Energiekonzepte, kombiniert mit interessanten Details für Spezialisten.

Die behandelten Themen umfassen Photovoltaik, solarthermische Energie, geothermische Energie, Energie aus Wind, Wellen, Gezeitenströmungen, Osmose, konventionelle Wasserkraft, biogene Energie, Wasserstofftechnologie mit Brennstoffzellen, effiziente Gebäudeklimatisierung und solar angetriebene Klimaanlage. Der hochaktuellen Frage, wie man mit erneuerbarer Energie mobil sein kann, widmet sich ein Kapitel über Elektromobilität. Ein neues Kapitel stellt die Herausforderung vor, besonders auch erneuerbare Energien in verstärkten Netzen weiträumiger zu verteilen. Auch die Behandlung biogener Energien wurde in zusätzlichen Kapiteln ausgebaut.

Die detaillierte Diskussion und Verweise auf die aktuelle Fachliteratur in jedem Kapitel ermöglichen es den Lesern, sich eine eigene Meinung über die Realisierbarkeit und das Potenzial dieser Technologien zu bilden. Das Buch eignet sich sehr gut für allgemein interessierte Leserinnen und Leser, darüber hinaus als Lehrbuch für fortgeschrittene Vorlesungen und Seminare über erneuerbare Energie. Besonders hilfreich ist es auch als Ratgeber für Studierende, die nach einem wichtigen und inspirierenden Thema für ihr Studium und ihre spätere wissenschaftliche Arbeit suchen.

Eicke R. Weber
 Direktor,
 Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE,
 Freiburg, Deutschland.

Geleitwort

Dieses Buch gibt einen umfassenden Einblick in die Entwicklung der erneuerbaren Energien, die ihren Teil zur Ersetzung fossiler Brennstoffe und der Kernenergie beitragen, um unserem Planeten eine gesunde Zukunft zu sichern.

Ich begrüße, dass hier eine Vielzahl der Möglichkeiten von Experten erschöpfend behandelt werden. Damit bekommen die Leser einen Überblick über den Stand der Entwicklung und lernen auch, den ökonomischen Wert vieler Teilgebiete zu verstehen. Gerade über Solarenergie kursiert oft in der Presse, ihr Einsatz sei viel zu teuer. Wenn es darauf ankäme, den Kohlendioxid-Ausstoß zu verringern, seien doch die Kernkraftwerke besser geeignet.

Solchen Argumenten muss entschieden widersprochen werden:

- 1) Einige der erneuerbaren Energien sind schon heute in der Gesamtbilanz billiger als Öl oder Kernenergie, zum Beispiel Windenergie oder solarthermische Energie. Andere interessante Gebiete stehen kurz davor, etwa die Photovoltaik.
- 2) Es ist irreführend, die Kernkraftwerke als eine attraktive Alternative zu sehen: Zum Aufbau eines Windparks braucht man zum Beispiel weniger als ein Jahr, und er kostet weniger als 30 % im Vergleich zu einem Kernkraftwerk gleicher Leistung. Dazu kommen bei einem Kernkraftwerk die Kosten für den Rückbau und die Endlagerung des radioaktiven Abfalls, der unsere Nachkommen noch viele Tausende von Jahren belasten wird. In der Öffentlichkeit wenig bekannt ist zudem, dass die Uranminen – meist in der Dritten Welt – mit ihren Abraumhalden große Areale radioaktiv belasten und mit Millionen Tonnen giftiger Schlämme Flüsse vergiften.

Die gute Nachricht ist, dass schon Ende 2009 die Jahresproduktion an Strom der weltweiten Windenergieanlagen und Solarzellen die Produktion der Kernkraftwerke in Frankreich und den USA zusammen übertraf. Die Vertreter dieser Industrie werfen uns Solarforschern gerne vor,

dass die Sonne nicht immer scheine. Wir antworten darauf aber entschieden: „Nein, in der Nacht natürlich nicht, aber wer will nachts schon mehr Energie haben, wenn schon zu viel Strom da ist, der preisgünstig angeboten wird!“ Wichtig ist, dass Solarzellen – weltweit gesehen – in der Mittags- und Nachmittagszeit, wenn der Bedarf sehr hoch ist, einen wesentlichen Beitrag leisten können.

Heute nimmt die Kraftwerks- und Ölindustrie die aufkommende Konkurrenz der Wind- und Solarenergie sehr ernst. In den USA erkennt man das leider auch daran, dass ihre Gegenlobbyarbeit in Washington erschreckend zugenommen hat. In den demokratischen Ländern sollten wir deshalb auch unsere Möglichkeiten als Wähler sehr ernst nehmen: Wir sollten die Parteien und Politiker wählen, die die Erfordernisse der Zeit und damit die Chancen erneuerbarer Energie klar verstehen und sich für deren Ausbau einsetzen.

Dieses Buch bietet allen Interessierten, die sich profund informieren wollen, und darüber hinaus all denen eine gute Auswahl, die in einer der vielen Sparten der erneuerbaren Energien tätig werden wollen. Es ist ein wichtiger Beitrag, um die dringend nötige Entwicklung voranzutreiben und damit eine drohende Katastrophe, verursacht durch unvernünftige Energiegewinnung, abzuwenden.

Insgesamt ist es eine Freude dieses Buch zu lesen, das in seiner hervorragenden Ausführung einen Ehrenplatz in jedem Bücherschrank verdient. Es hat einen bleibenden Wert, den augenblicklichen Stand einer rasanten Entwicklung in der Geschichte der erneuerbaren Energie festzuhalten.

Karl W. Böer,
Distinguished Professor of Physics and Solar Energy,
emeritus
University of Delaware

Kompetent mitreden

In den fünf Jahren seit Erscheinen der 1. Auflage dieses Buchs hat sich die Welt in puncto Energie dramatisch gewandelt. Das spiegelt die inzwischen auf fast 30 Kapitel angewachsene 3. Auflage wider. Größter Einschnitt war der furchtbare Tsunami, der Japan im März 2011 traf und im Kernkraftwerk von Fukushima eine Reaktorkatastrophe auslöste. Dieses Drama führte der Welt erneut vor Augen, dass jeder – theoretisch noch so unwahrscheinliche – schwere oder katastrophale Kernkraftunfall einer zu viel für unseren immer dichter bevölkerten Planeten ist.

Angesichts dieser Katastrophe beschloss die Bundesregierung, dass Deutschland bis 2022 komplett aus der Kernenergie aussteigen soll. Trotzdem will sie die ehrgeizigen deutschen Ziele in der Reduktion der Treibhausgasemissionen erreichen. Erneuerbare Energiequellen werden dabei eine wachsende Rolle spielen.

Harald Kohl und Wolfhart Dürrschmidt vom Bundesumweltministerium stellen im ersten Kapitel die aktuelle Situation in Deutschland aus erster Hand vor. Sie zeigen zudem, wie stürmisch sich die Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Europa, den USA und Asien entwickelt. Die Windenergie gehört inzwischen zu den dynamischsten Wachstumsbranchen weltweit. Deutschland ist vorne mit dabei und profitiert: Fast 400 000 Jobs sind auf dem Gebiet der erneuerbaren Energie entstanden, viele davon in der Windenergie.

In der Solarenergie geschieht ebenfalls viel. Inzwischen bekommen die etablierten Technologien auf Siliziumbasis zunehmend Konkurrenz durch Energie und Material sparende Dünnschichtmodule. Dementsprechend hat Nikolaus Meyer vom Berliner Pionier Solteecture sein Kapitel über Chalkopyrit (CIS)-Solarzellen komplett runderneuert. Völlig neu ist ein Kapitel über die vielversprechenden Kadmiumtellurid (CdTe)-Dünnschichtzellen von Michael Harr, dem CdTe-Pionier Dieter Bonnet und Karl-Heinz Fischer. Fischer war im Vorstand des Bundesverbands Solarwirtschaft maßgeblich am Zustandekommen des deutschen Erneuerbare-Energie-Gesetzes beteiligt.

Die Biokraftstoffbranche hat dagegen ein Imageproblem. Gerhard Kreysa analysiert klug und kritisch, welchen Beitrag solche Kraftstoffe zur Weltenergieversorgung überhaupt sinnvoll leisten können. Nicolaus Dahmen und seine Mitstreiter stellen das umweltverträgliche bioliq®-Verfahren

vom Karlsruher Institut für Technologie vor, das vor der Kommerzialisierung steht. In eine Zukunft mit Kraftstoffen aus Algenfarmen blickt Carola Griehls Team.

Strom aus erneuerbarer Energie muss intelligent verteilt und gespeichert werden. Entsprechend ist das Thema Stromnetze im Buch stark angewachsen. Dazu gehört die Vision vom Sonnenstrom aus der Wüste. Franz Trieb vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt war an der Desertec-Studie beteiligt und stellt ihre Resultate detailliert vor.

Fast alle Beiträge stammen von ausgewiesenen Expertinnen und Experten auf ihrem jeweiligen Gebiet. Das macht dieses Buch zu einer besonders wertvollen und verlässlichen Informationsquelle. Hier wird fundiert erklärt, wie eine Technik funktioniert. Ein Teil der Beiträge ist ursprünglich in der Zeitschrift *Physik in unserer Zeit* erschienen, andere Kapitel wurden eigens für dieses Buch verfasst.

Auf jeden Fall können alle Leserinnen und Leser mit Allgemeinbildung das Buch mühelos verstehen. An sehr wenigen Stellen gibt es etwas Mathematik. Wir haben diese Formeln bewusst für die Leser stehen gelassen, die tiefer einsteigen möchten. Diese seltenen, kurzen Passagen lassen sich aber einfach überspringen, ohne dabei den Faden zu verlieren. Ausführliche Literaturlisten sowie Weblinks (alle kurz vor dem Druck auf Aktualität gecheckt) bieten reichliche Möglichkeiten, den Stoff weiter zu vertiefen.

Alle Zahlen und Fakten sind sorgfältig geprüft, was nicht selbstverständlich ist. Leider sind über erneuerbare Energie viele Fehlinformationen und irreführende Mythen im Umlauf. Deshalb soll dieses Buch allen Interessierten eine verlässliche, solide Informationsquelle anbieten, die auch als Nachschlagewerk funktioniert. Wer es liest, kann kompetent mitreden.

Wir danken allen Autoren für die reibungslose, erfreuliche Zusammenarbeit und dem Verlag für das wundervoll gemachte, durchgehend farbige Buch.

Thomas Bürke und Roland Wengenmayr

Schwetzingen und Frankfurt am Main, im August 2011.

Inhalt



Foto: GFZ



Foto: Vestas Central Europe

Vorwort

Eicke R. Weber

Geleitwort

Karl W. Böer

1 Vorwort der Herausgeber

2 Inhaltsverzeichnis

Entwicklung der erneuerbaren Energien

4 Regenerative Energieträger – ein Überblick

Harald Kohl, Wolfhart Dürschmidt

Windenergie

14 Rückenwind für eine zukunftsfähige Technik

Martin Kühn, Tobias Klaus

Wasserkraftwerke

24 Fließende Energie

Roland Wengenmayr

Solarthermische Kraftwerke

28 Wie die Sonne ins Kraftwerk kommt

Robert Pitz-Paal

Photovoltaik

36 Solarzellen – ein Überblick

Roland Wengenmayr

Neue Materialien der Photovoltaik

44 Solarzellen aus Folien-Silizium

Giso Hahn

CIS-Dünnschicht-Solarzellen

52 Günstige Module für solares Bauen

Nikolaus Meyer

CdTe-Dünnschicht-Solarzellen

56 Auf dem Weg zur Netzparität

Michael Harr, Dieter Bonnet, Karl-Heinz Fischer

Geothermische Wärme- und Stromerzeugung

60 Energie aus der Tiefe

Ernst Huenges

Biokraftstoffe

69 Grüne Chance und Gefahr

Roland Wengenmayr

Biokraftstoffe sind nicht per se nachhaltig

72 Irrungen und Wirrungen um Biokraftstoffe

Gerhard Kreysa

Kraftstoffe aus Algen

79 Konzentrierte grüne Energie

Carola Griehl, Simone Bieler, Clemens Posten

Das Karlsruher Verfahren bioliq®

83 Synthesekraftstoffe aus Biomasse

Nicolaus Dahmen, Eckhardt Dinjus, Edmund Henrich

Das Aufwindkraftwerk

88 Strom aus heißer Luft

Jörg Schlaich, Rudolf Bergemann, Gerhard Weinreb



Foto: Voith Hydro



Foto: DLR

95 **Gezeitenströmungskraftwerke**
Mond, Erde und Sonne als Antrieb

Albert Ruprecht, Jochen Weilepp

Wellenkraftwerke

100 **Energiereservoir Ozean**

Kai-Uwe Graw

Osmosekraftwerke

107 **Salz- contra Süßwasser**

Klaus-Viktor Peinemann

Energieübertragung von Offshore-Windenergieparks

109 **Die Nordsee geht ans Netz**

Boris Valov, Peter Zacharias

Elektrische Energieversorgung der Zukunft

112 **Neuer Strom in alten Netzen?**

Stefan Tenbohlen, Alexander Probst, Patrick Wajant

DLR-Studien zum Projekt Desertec

120 **Strom aus der Wüste**

Franz Trieb

Wasserstoff als Energiespeicher

128 **Wasserstoff: Alternative zu fossilen Energieträgern?**

Detlef Stolten

Saisonale Speicherung thermischer Energie

133 **Wärme auf Abruf**

Silke Köhler, Frank Kabus, Ernst Huenges

Brennstoffzellen im mobilen und stationären Einsatz

140 **Gebändigtes Knallgas**

Joachim Hoffmann

Mobilität und erneuerbare Energie

148 **Elektrofahrzeuge**

Andrea Vezzini

Solare Klimatisierung

156 **Kühlende Hitze**

Roland Wengenmayr

Klima-Engineering

158 **Prima Klima im Glashaus**

Roland Wengenmayr

Niedrigenergie-Wohnheim mit Biogas-Heizung

161 **Nachhaltigkeit mit ungewöhnlichem Konzept**

Christian Matt, Matthias Schuler

Gebäudethermographie unter der Lupe

164 **Die Versuchung bunter Bilder**

Michael Vollmer, Klaus-Peter Möllmann

Erneuerbare Energie in Deutschland

168 **Fördermöglichkeiten und Informationsquellen**

Thomas Bürhke

170 **Stichwortverzeichnis**



Die große Photovoltaik-Dachanlage auf der Münchner Messe hat eine Nennleistung von rund 1 MW_{el} (Foto: Shell Solar).

Entwicklung der erneuerbaren Energien

Regenerative Energieträger – ein Überblick

HARALD KOHL | WOLFHART DÜRRSCHMIDT

Erneuerbare Energien haben sich zum globalen Erfolgsmodell entwickelt. Welchen Beitrag leisten sie in Deutschland, der EU und international? Wie hoch ist ihr Ausbaupotenzial? Eine aktuelle Bilanz des Innovationsgeschehens.

Erneuerbare Energien haben sich heute in Europa, den USA und Asien zum Erfolgsmodell entwickelt. Aktuelle Beschlüsse, Daten, Berichte, Studien, Gesetze etc. finden sich auf der Themenseite des Bundesumweltministeriums zu erneuerbaren Energien [1].

Die EU mit anspruchsvollen Zielen

Schauen wir uns zuerst die Entwicklung in der Europäischen Union an: Am 25. Juni 2009 ist die Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und Rates zur Förderung der Erneuerbaren Energien in der Europäischen Union in Kraft getreten [2]. Verbindliches Ziel dieser Richt-

linie ist es, den Anteil der erneuerbaren Energie am gesamten Brutto-Endenergieverbrauch in der EU von ca. 8,5 % im Jahr 2005 auf 20 % bis zum Jahr 2020 zu steigern. Dabei soll ihr Anteil im Verkehrssektor in allen Mitgliedstaaten im Jahr 2020 mindestens 10 % betragen. Darin eingerechnet sind nicht nur Biotreibstoffe, sondern auch der Antrieb mit Strom auf Basis erneuerbarer Energie. Für den Anteil regenerativer Energie am gesamten Brutto-Endenergieverbrauch (Strom, Wärme/Kälte und Transport) wurde für jeden Mitgliedstaat ein verbindliches eigenes Ziel festgelegt, das vom Ausgangswert abhängt. Für Deutschland liegt dieses Ziel für das Jahr 2020 bei 18 %, für die Nachbarländer Belgien bei 13 %, Dänemark bei 30 %, Frankreich bei 23 %, Luxemburg bei 11 %, die Niederlande bei 14 %, Österreich bei 34 %, Polen bei 15 % und Tschechien bei 13 %.

Die Mitgliedstaaten können die Instrumente zum Erreichen dieser Ziele selbst wählen. Besonders erfolgreich verläuft der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energie zur Stromgewinnung in den Mitgliedstaaten, die Vorrang- und



Montage einer Windenergieanlage im Offshore-Windenergiepark Alpha Ventus, der 2009 in der Nordsee in Betrieb ging (Foto: alpha ventus).

TAB. 1 | GLOBAL INSTALLIERTE WINDLEISTUNG IN MW IM JAHR 2010

Region	Land (Beispiele)	Ende 2009	neu in 2010	Ende 2010
Afrika und Mittlerer Osten	Ägypten	430	120	550
	Marokko	253	33	286
	total	866	213	1 079
Asien	China	25 805	16 500	42 287
	Indien	10 926	2 139	13 065
	Japan	2 085	221	2 304
	total	39 639	19 022	58 641
Europa (EU- und Nicht-EU-Staaten)	Deutschland	25 777	1 493	27 214
	Spanien	19 160	1 516	20 676
	Italien	4 849	948	5 797
	Frankreich	4 574	1 086	5 660
	Vereinigtes Königreich	4 245	962	5 204
	Österreich	995	16	1 011
total	76 300	9 883	86 075	
Lateinamerika und Karibik	Brasilien	606	326	931
	Mexiko	202	316	519
	total	1 306	703	2 008
Nordamerika	USA	35 086	5 115	40 180
	Kanada	3 319	690	4 009
	total	38 405	5 805	44 189
Pazifik	Australien	1 702	167	1 880
	total	2 221	176	2 397
Global total		158 738	35 802	194 390

Quelle: [10]. Wegen Rundungen, Rückbau von Anlagen und unterschiedlichen Statistiken teilweise vorläufige Werte und Abweichungen von nationalen Statistiken.

Einspeiseregulungen analog zum deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) eingeführt haben. 20 der EU-Staaten haben inzwischen solche gesetzliche Förderinstrumente in Kraft; global sind es bereits über 50 Staaten [3, 4].

Als Zwischenbilanz ergaben sich für das Jahr 2009 folgende Anteile der erneuerbaren Energie in der EU: Elektrizität: rund 17 %, Wärme/Kälte: rund 10 %, Straßenverkehr: rund 4 %. Die Anlagen zur Stromgewinnung, vor allem aus der Windkraft, der Solarenergie und der Bioenergie, konnten deutlich weiter entwickelt werden. Sie dürften auch in Zukunft diesen Vorsprung halten. Dabei kommt es nicht nur auf den technischen Fortschritt und die Kosteneffizienz an, sondern auf die Ausgestaltung nach allen Kriterien der Nachhaltigkeit. Systemanalyse und -optimierung, Partizipation und Akzeptanz der Beteiligten, ökologische Begleitforschung, Umwelt- und Naturschutz sowie Ressourcenschonung erhalten zunehmende Bedeutung. Damit im Jahr 2020 10 % Anteil im Transportbereich und 20 % Anteil am gesamten Endenergieverbrauch erzielt werden können, muss die Stromversorgung 2020 bereits rund ein Drittel auf erneuerbaren Energien basieren. Mit regelmäßigen Berichten der Mitgliedstaaten und der EU-Kommission wurde ein engmaschiges Monitoringsystem entwickelt [4-6].

Windenergie boomt international

Gerade das Beispiel der Windenergie zeigt, dass die Erfolge selbst bei vergleichbarer Ausgangssituation sehr unterschiedlich sein können. Die umwelt- und energiepolitischen Rahmenbedingungen sind hier entscheidend. Besonders das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) mit sei-

nen investitionsfreundlichen Einspeise- und Vergütungsregelungen hat - neben der ähnlichen spanischen Gesetzgebung - im internationalen Vergleich besonders gut gewirkt. Im Jahr 2010 waren mit rund 48 000 MW Windleistung in Deutschland und Spanien über die Hälfte der gesamten Windleistung in der EU (rund 84 000 MW) installiert [7].

Aber nicht nur in der EU, auch in China, Indien und den USA boomt der große Markt für Windenergieanlagen (Tabelle 1). Hier hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten ein leistungsfähiger Maschinenbauzweig entwickelt. Durchgesetzt haben sich überwiegend Megawattanlagen. Zu den führenden Herstellern gehören dänische und deutsche Firmen. Etwa drei Viertel der in Deutschland hergestellten Windkraftanlagen werden mittlerweile exportiert. Einen ähnlichen Vorsprung hat sich Deutschland im Solarstrombereich erarbeitet, sowohl bei der Photovoltaik als auch bei der Solarthermie.

Erfolgreiche Politik in Deutschland

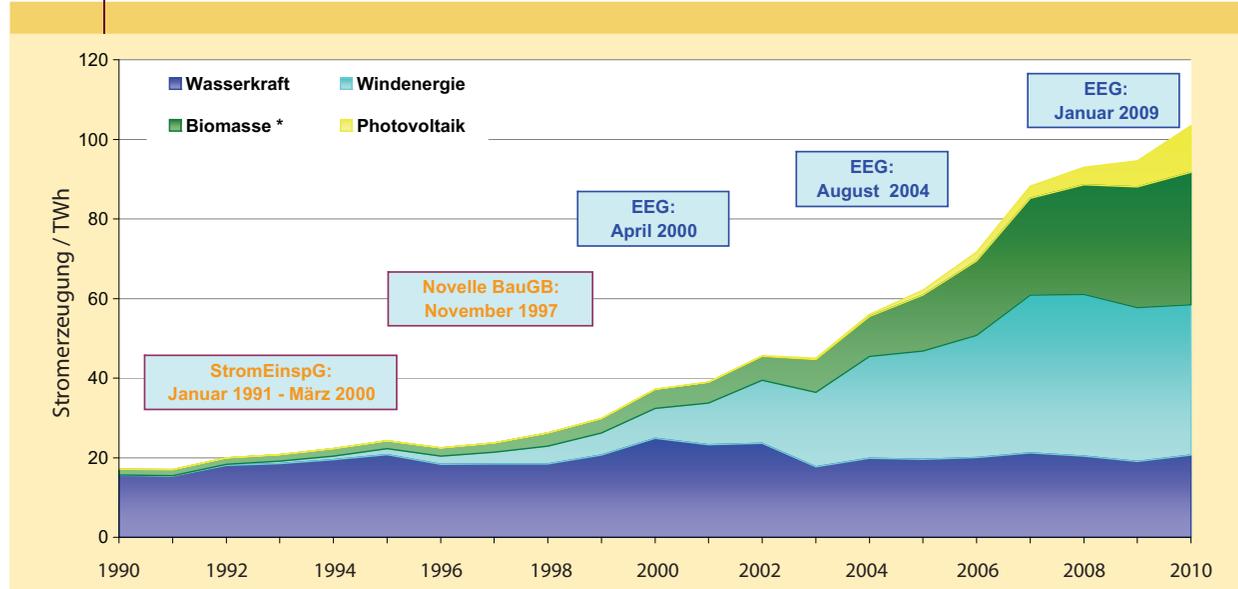
Besonders das deutsche Beispiel zeigt, wie das Engagement einzelner Protagonisten, die Unterstützung durch passende Instrumente (Forschung und Entwicklung, EEG, EEWärmeG, Markteinführungshilfen etc.) sowie die Kooperation von Wissenschaft und innovativen Unternehmen im Bereich der erneuerbaren Energie völlig neue High-Tech-Branchen entstehen ließ. Sie sind heute wirtschaftlich erfolgreiche Global Player. Die TU Berlin analysierte diese Entwicklung der letzten Jahrzeh-

INTERNET

BMU-Publikation [4] und anderes Material www.erneuerbare-energien.de

ABB. 1 DEUTSCHER STROM AUS ERNEUERBARER ENERGIE

Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland von 1990 bis 2010 (TWh: Terawattstunden; 1 TWh = 1 Mrd. kWh; EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz seit 1.4.2000; StromEinspG: Stromeinspeisungsgesetz von 1.1.1991 bis 31.03.2000; BauGB: Baugesetzbuch) (Quelle: [4]).



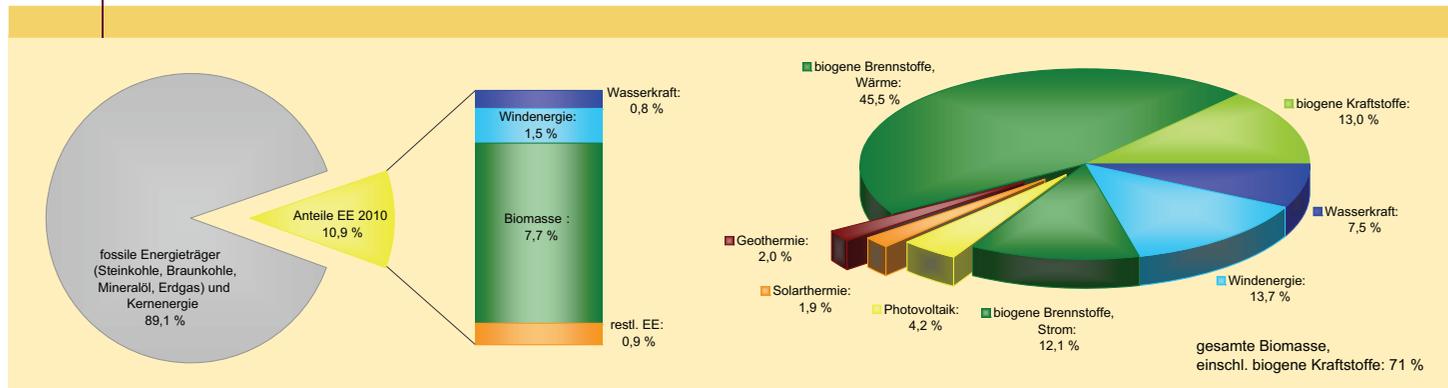
te in einem vom deutschen Bundesumweltministerium (BMU) geförderten Forschungsprojekt [8–9]. Schauen wir uns die Entwicklung in Deutschland genauer an.

In Deutschland hat die erneuerbare Energie in den letzten Jahren stürmisch zugelegt. Im Jahr 2010 stammten 17 % der Energie aus deutschen Steckdosen aus regenerativen Energiequellen, fast sechs Mal so viel wie noch 1990 [4]. Dies lag zunächst am erfolgreichen Ausbau der Windenergie, inzwischen aber auch der Bioenergie und Photovoltaik. Mit einer Energiebereitstellung von 37 Terawattstunden (TWh) im Jahr 2010 hat die Windenergie die traditionell vorhandene Wasserkraft (mit 19,7 TWh in 2010) deutlich überholt. Die Stromerzeugung aus Bioenergie (einschließlich des biogenen Anteils des Abfalls) hat sich mit rund 34 TWh in 2010 inzwischen auf Platz zwei vorgearbeitet. Auch die Photovoltaik hat kräftig aufgeholt und trug 2010 mit 12 TWh bereits zwei Prozent zur Stromversorgung bei. Sie hat damit seit

dem Jahr 2000 um den Faktor 200 zugelegt. Die geothermische Stromgewinnung spielt noch eine geringe Rolle. Abbildung 1 zeigt die rasante Ausbaudynamik der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland. Im ersten Halbjahr 2011 stieg der Anteil der erneuerbaren Energie an der gesamten Stromgewinnung bereits auf rund 20 % [1].

Deutschland hat damit das vor wenigen Jahren von der Bundesregierung beschlossene Ausbauziel für Strom aus erneuerbaren Energien – 12,5 % wurden damals für das Jahr 2010 angestrebt – deutlich übertroffen; ein großer Erfolg aller Beteiligten. Die neuen Beschlüsse der Bundesregierung zum Energiewendepaket vom 6. Juni 2011 enthalten insbesondere auch ambitioniertere Ausbauziele für die erneuerbare Energie in Deutschland. Für den Strombereich wurden diese Ziele im neuen EEG bereits im Sommer 2011 gesetzlich verankert [1]. Die Details sind in „Ausbauziele zur erneuerbaren Energie in Deutschland“ auf S. 11 aufgeführt.

ABB. 2 ENDENERGIEVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND 2010



Links: Anteile der konventionellen und erneuerbaren Energiequellen (EE) am gesamten Endenergieverbrauch von 9060 Petajoule (PJ, 1 PJ = 10¹⁵ J, Joule) in Deutschland 2010; rechts: Struktur der Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen von insgesamt 275,2 Terawattstunden (TWh) in Deutschland 2010 (Quelle: [4]).

Heutiger Stand

Abbildung 2 zeigt links die Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2010. Es überrascht nicht, dass fossile Quellen sowie die Kernenergie mit zusammen 89,1 % noch dominieren [4]. Die erneuerbaren Energiequellen kamen 2010 bereits auf 10,9 %. Rechts zeigt Abbildung 2 die Struktur der Endenergiebereitstellung aus erneuerbarer Energie im Jahr 2010 [4]. Über zwei Drittel dieser regenerativen Energieträger (71 %) stammen aus Biomasse. Die Windenergie steuert 13,4 %, Wasserkraft 7,2 %, Solarenergie 6,3 % und Geothermie 2,1 % bei.

Der Grund für den kräftigen Aufschwung regenerativer Energieträger in Deutschland liegt vor allem in der Politik. In den letzten zwanzig Jahren wurden Rahmenbedingungen geschaffen, die den erneuerbaren Energien trotz ihrer vergleichsweise noch hohen Strombereitstellungskosten die Chance geben, sich im Markt zu etablieren. Neben verschiedenen Förderprogrammen und dem Markteinführungsprogramm der Bundesregierung waren es vor allem das Stromeinspeisegesetz (StrEG) von 1990 und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von 2000, das diese Entwicklung in Gang setzte. Das Prinzip: Regenerativ erzeugter Strom wird vorrangig und garantiert ins öffentliche Netz eingespeist und mit einem Mindestsatz vergütet. Auf der Basis regelmäßiger EEG-Erfahrungsberichte wird das EEG der aktuellen Situation angepasst, zuletzt im Sommer 2011 [1].

Die Vergütungen sind nach Sparten und anderen Erfordernissen der einzelnen Energieträger gestaffelt. Sie sind degressiv gestaltet, sinken also Jahr für Jahr. Das soll dafür sorgen, dass erneuerbare Energietechnologien ihre Kosten reduzieren und mittelfristig zu Marktpreisen wettbewerbsfähig werden. Die regenerativen Technologien können das nur durch zeitweilige Förderung schaffen, wie sie in der Vergangenheit auch anderen Energietechniken wie etwa der Kernenergie gewährt wurden. Sie werden bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts nur dann zum Hauptpfeiler der Energieversorgung, wenn sie Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit beweisen. Dazu muss jede Technologie den langen Weg von der Forschung und Entwicklung über Pilot- und Demonstrationsprojekte sowie Markteinführungshilfen bis hin zur vollen Wettbewerbsfähigkeit schaffen. Das geht nur mit staatlicher Unterstützung sowie der schrittweisen Einbeziehung der ökonomischen Nutzwirkung.

Potenzial und Grenzen

Oft wird das Potenzial der Techniken, die erneuerbare Energiequellen erschließen, skeptisch beurteilt. Können erneuerbare Energien entscheidend zur Sättigung des wachsenden weltweiten Energiehungers beitragen? Sind dem Aufschwung nicht physikalische, technische, ökologische und infrastrukturelle Grenzen gesetzt?

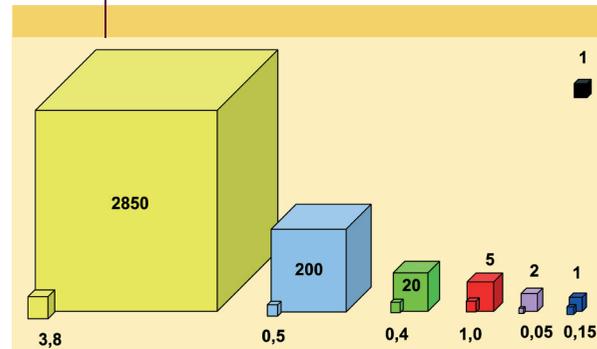
Grundsätzlich ist das Potenzial enorm groß. Die meisten erneuerbaren Energien speisen sich direkt und indirekt aus Solarenergie, und die Sonne sorgt für einen kontinuierlichen Energiefluss von über 1,3 kW/m² an der Erdober-

fläche. Geothermie nutzt die Wärme des Erdinneren, die sich aus der kinetischen Energie aus der Entstehungsphase der Erde und radioaktiven Zerfallsprozessen speist (siehe Kapitel „Energie aus der Tiefe“ in diesem Buch).

Diese Energiequellen sind bei weitem nicht vollständig nutzbar. Umwandlungsprozesse, Grenzen für Wirkungsgrade und Anlagengrößen schaffen technische Restriktionen. Hinzu kommen infrastrukturelle Einschränkungen, wie Ortsgebundenheit bei der Erdwärme, begrenzter Transportradius für biogene Brennstoffe, Verfügbarkeit von Flächen und Konkurrenz bei ihrer Nutzung. Nicht zuletzt spielt die begrenzte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Energiedarbietung aus fluktuierenden Quellen eine wichtige Rolle. Außerdem sollen erneuerbare Energien auch ökologisch verträglich sein. Die Beanspruchung von Böden, Beeinträchtigung von Fließgewässern, Arten- und Naturschutz sowie der Landschafts- und Meeresschutz setzen weitere Grenzen. Das alles sorgt dafür, dass das natürliche, globale Angebot an erneuerbaren Energien und die daraus technisch gewinnbaren Energiemengen weit auseinander klaffen (Abbildung 3).

Trotz dieser Einschränkungen ist eine breite Versorgung mit erneuerbaren Energien möglich. Damit sie zuverlässig und stabil ist, braucht es einen möglichst vielfältigen Mix verschiedener regenerativer Energiequellen. Prinzipiell können Wasser- und Windkraft, Meeresenergie, Biomasse-Nutzung, Solarenergie und Geothermie zusammen alle Bedürfnisse decken. Deutschland ist dafür ein gutes Beispiel. Obwohl nicht im sonnigen Süden gelegen und mit nur begrenzten Ressourcen im Bereich der Wasserkraft und Geothermie, kann erneuerbare Energie langfristig den gesamten deutschen Energiebedarf decken. Schätzungen zufolge liegt das langfristig nachhaltige nutzbare Potenzial in Deutschland bei etwa 800 TWh für Strom, 900 TWh für Wärme und 90 TWh bei Treibstoffen [4, 11]. Dies entspricht rund 130 % des derzeitigen Stromverbrauchs und 70 % des der-

ABB. 3 | NATÜRLICHES ANGEBOT UND NUTZBARKEIT



Das natürliche Angebot an regenerativer Energie im Verhältnis zum heutigen Weltenergieverbrauch (schwarzer Würfel, auf 1 normiert). Kleine Würfel: Anteil der jeweiligen Energiequelle, der technisch, ökonomisch und ökologisch vernünftig nutzbar ist. Gelb: Solarstrahlung auf Kontinente, blau: Wind, grün: Biomasse, rot: Erdwärme, dunkelblau: Wasser (Quelle: [11]).

zeitigen Wärmebedarfs. Bei verbesserter Energieeffizienz und sinnvollem Einsatz von Strom bei Wärme- und Kälteanwendungen sowie Mobilität lässt sich der Energiebedarf in Deutschland langfristig vollständig auf Basis erneuerbarer Energiequellen decken.

Wasserkraft

Wasser ist eine der ältesten Energiequellen. Heute liefert die Wasserkraft in Deutschland nur einen kleinen, seit Jahrzehnten stabilen Beitrag: 3 bis 4 % des Stroms stammen aus Speicher- und Laufwasserkraftwerken. Das Potenzial ist in Deutschland insgesamt recht gering, anders als in Alpenländern wie Österreich und der Schweiz. In Zukunft wird sie deshalb hier nur moderat ausgebaut werden können. 2010 stellten die über 7000 großen und kleinen Anlagen rund 20 TWh Energie bereit, 90 % davon in Bayern und Baden-Württemberg. Das weltweite Potenzial der Wasserkraft ist erheblich größer: 16 % des erzeugten Stroms kam 2010 aus Wasserkraftwerken [12, 13]. Damit liegt die Wasserkraft – global gesehen – vor der Kernkraft. Bislang ist sie die einzige regenerative Energiequelle, die im großen Umfang zum Weltbedarf an elektrischer Energie beiträgt; die anderen Sparten der erneuerbaren Energie trugen 2010 zusammen rund 3 % zur globalen Stromerzeugung bei [12, 13]. Entscheidend ist dabei vor allem die „große Wasserkraft“. Ein Beispiel ist das chinesische Drei-Schluchten-Projekt, das es auf eine elektrische Leistung von über 18 GW bringt, was etwa 14 Kernkraftwerksblöcken entspricht (siehe Kapitel „Fließende Energie“).

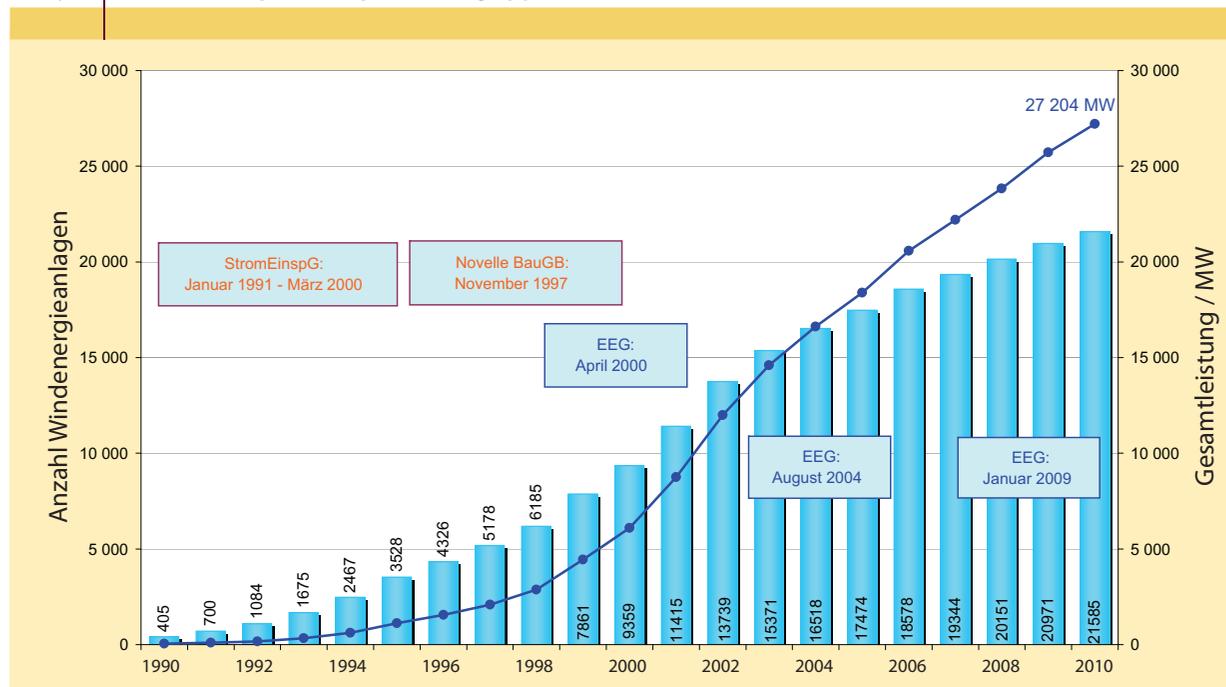
In Deutschland bietet die sogenannte „kleine“ Wasserkraft noch begrenzte Entwicklungsmöglichkeiten. Neubau und Modernisierung derartiger Wasserkraftanlagen unter 1 MW Leistung hat allerdings ökologische Grenzen, denn sie nutzen Bäche und kleine Flüsse und können deren Ökosysteme verändern. Synergieeffekte lassen sich dann erzielen, wenn bestehende Wasserkraftanlagen mit Querverbauungen (Dämmen) so modernisiert werden, dass die Leistung erhöht und zugleich der gewässerökologische Zustand verbessert wird. Das Ausbaupotenzial in Deutschland wird von derzeit 20 auf 25 TWh pro Jahr geschätzt.

Die Vorteile der Wasserkraft liegen auf der Hand: Die Energie steht meist stetig zur Verfügung, und Wasserkraftwerke sind sehr langlebig. Zudem sind Wasserturbinen extrem effizient, sie können bis zu 90 % der kinetischen Energie des fließenden Wassers in Strom umwandeln. Zum Vergleich: Moderne Erdgas-Kombikraftwerke erreichen 60 % Wirkungsgrad, Leichtwasserreaktoren sogar nur etwa 33 %.

Windenergie an Land

In Deutschland hat die Nutzung der Windenergie (36,5 TWh) die der Wasserkraft (19,7 TWh) im Jahr 2010 deutlich überholt. Moderne Windenergieanlagen erreichen Wirkungsgrade von bis zu 50 %. Im Jahr 2010 wurde eine Windleistung von 1 551 MW neu installiert, so dass 21 607 Windräder mit einer Gesamtleistung von 27 214 MW etwa 6 % des Strombedarfs erzeugten [14]. In einem durchschnittlichen Windjahr wären es bereits 7 % gewesen. Inzwischen kommt das sogenannte Repowering in Gang: al-

ABB. 4 | WINDENERGIEANLAGEN IN DEUTSCHLAND



Entwicklung der Windenergie in Deutschland von 1990 bis 2010. Die Balken zeigen die Gesamtzahl der Windenergieanlagen im jeweiligen Jahr an, die blaue Kurve die installierte Gesamtleistung in Megawatt (MW) (Quelle: [14]).

te Anlagen werden durch moderne, leistungsfähigere ersetzt. So wurden 2010 116 alte Windanlagen mit zusammen 56 MW durch 80 neue mit insgesamt 183 MW Leistung ersetzt [14].

Im ersten Halbjahr 2011 wurden in Deutschland 356 Anlagen mit einer Gesamtleistung von zusammen 793 MW errichtet; pro Anlage also gut 2 MW. Bei einem langfristig nachhaltig realisierbaren Windpotenzial in Deutschland an Land von 80 000 MW und einer durchschnittlich installierten Leistung von 2,5 MW wären 32 000 solcher Anlagen erforderlich. Derzeit (Mitte 2011) sind es bereits rund 22 000 Anlagen mit einer durchschnittlich installierten Leistung von 1,3 MW. Im Hinblick auf Akzeptanz, Bürgerbeteiligung, Schallschutz, Anliegen des Natur- und Landschaftsschutzes wird es also vor allem darauf ankommen, im Zuge der Genehmigungsverfahren und der Raumplanung an geeigneten Standorten leistungsfähige Windanlagen auf hohen Masten (größerer Windertrag) zu errichten.

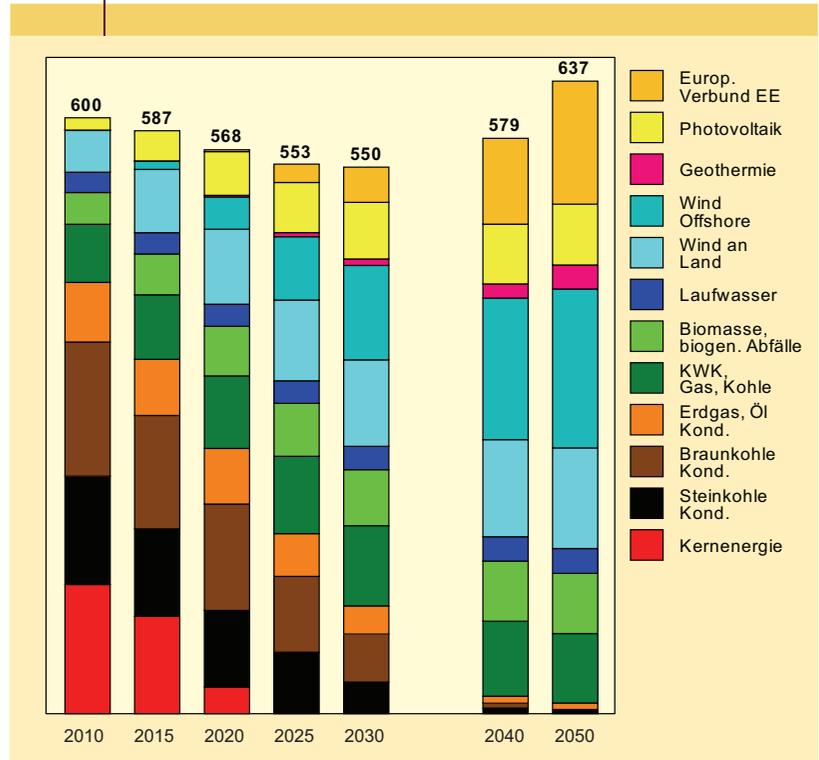
Damit kann die Anzahl der Anlagen begrenzt und doch ein hoher Ertrag erzielt werden: 32 000 Anlagen an Land mit je 2,5 MW können bei 2 500 Volllaststunden im Jahr zusammen 200 TWh Strom liefern, das heißt, etwa ein Drittel des heutigen Elektrizitätsbedarfs. Dies ist möglich an geeigneten Küstenstandorten, aber auch im Binnenland bei Nabenhöhen über 100 m. Ein geringer Teil dieses Potenzials könnte auch durch moderne kleine Anlagen erschlossen werden, wobei auch hier die genannten Kriterien zu berücksichtigen sind. Ein etwa gleich großes Potenzial in der Größenordnung von 200 TWh kann zusätzlich durch Windanlagen in der Nord- und Ostsee (Offshore) hinzukommen, so dass allein die Nutzung der Windkraft in Deutschland langfristig zwei Drittel unseres heutigen Strombedarfs (rund 600 TWh) decken kann.

An windreichen Tagen übersteigt der Windstromertrag in bestimmten Regionen Deutschlands bereits heute die Stromnachfrage, bei Windflauten müssen andere Kraftwerke das schwankende Angebot ausgleichen. Dies betrifft zunehmend auch die Photovoltaik, während Wasserkraft und Biomasse „eingebaute“ Energiespeicher haben und damit regelbar sind. Das zukünftige Energiesystem wird dem fluktuierenden Stromangebot gerecht werden müssen durch schnell regelbare dezentrale Kraftwerke (BHKW; Erdgas oder Gas auf Basis erneuerbarer Energie), Energiespeicher, Lastmanagement etc. Diese Neuausrichtung der Systemoptimierung unter dem Gesichtspunkt der Versorgungssicherheit und der Nutzung von Regelungs-, Steuerungs-, Informations- und Kommunikationstechnik gilt als besondere Herausforderung für die nächste Zeit [15-16].

Biomasse

Die energetische Nutzung der Biomasse wird oft unterschätzt. Zurzeit wird sie in Deutschland als Brennstoff neu entdeckt. Holz, Bioabfälle, Gülle und andere Stoffe pflanzlicher und tierischer Herkunft können thermisch, aber auch in der Stromerzeugung genutzt werden. Besonders effizient

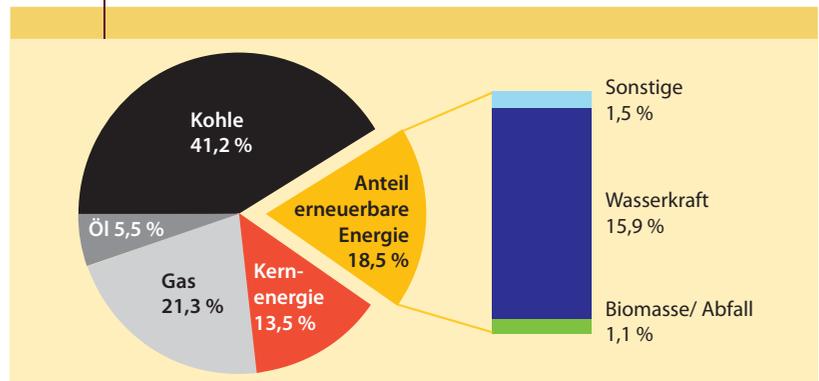
ABB. 5 | STROMERZEUGUNG IN ZUKUNFT



Stromerzeugung in Deutschland nach Kraftwerksarten und Energiequellen im Basisszenario A der „Leitstudie 2010“. Zahlen über den Balken: Bruttostromerzeugung in TWh. Der Kernenergie-Ausstiegspfad entspricht etwa dem Ausstiegsschluss vom 6. Juni 2011 (Quelle: [16]).

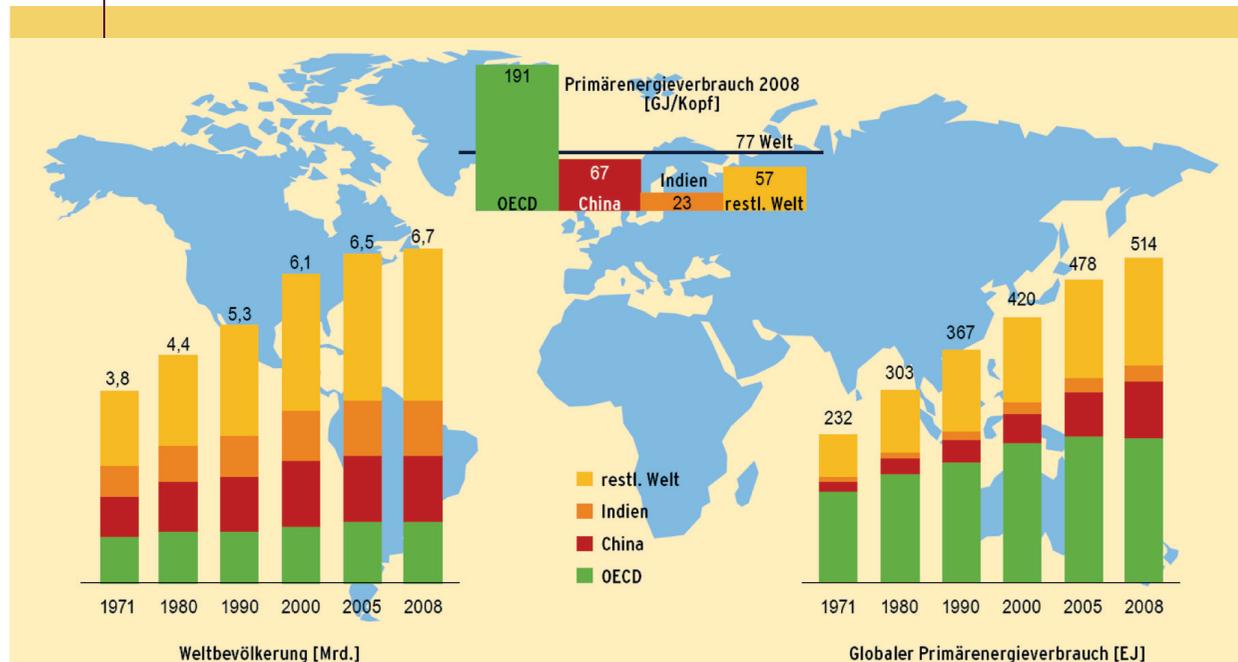
ist die Kopplung von beidem. In Deutschland stammen derzeit 90 % der erneuerbaren Wärme aus Biobrennstoffen, vor allem aus der Holzverbrennung - aber zunehmend auch aus Restholzkraftwerken, Hackschnitzel- und Pelletheizungen und Biogasanlagen sowie dem biogenen Anteil des Abfalls. Ihr Anteil an der Stromversorgung steigt: 2010 deckte er mit 34 TWh bereits 5,6 % des gesamten deutschen Stromverbrauchs.

ABB. 6 | WELTSTROM AUS ERNEUERBAREN



Anteile der erneuerbaren Energiequellen an der Stromerzeugung im Jahr 2008 (Quellen: [4, 18]).

ABB. 7 | WELTBEVÖLKERUNG UND PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH



Wachstum der Weltbevölkerung (Mrd.: Milliarden) und ihres Verbrauchs an Primärenergie (E: Exajoule, 10^{18} Joule). 2008 verbrauchte jeder Mensch in den OECD-Staaten durchschnittlich 191 Gigajoule (GJ, 10^9 Joule), in China 67 GJ, in Indien, 23 GJ und im Rest der Welt 57 GJ. Der Durchschnittsverbrauch aller Menschen lag bei 77 GJ pro Kopf. (Quelle: [18].)

Biobrennstoffe stehen rund um die Uhr zur Verfügung und können wie jeder andere Brennstoff in Kraftwerken eingesetzt werden. Biogene Kraftstoffe bringen, wie schon erwähnt, regenerative Energien auch im Verkehr in Fahrt.

Biokraftstoffe sind allerdings auch massiv in die öffentliche Kritik geraten, weil sie nicht immer und überall ökologisch und sozial verträglich erzeugt werden. Im schlimmsten Fall können sie sogar eine schlechtere Klimabilanz als fossile Kraftstoffe aufweisen. Es bedarf also einer kritischen Analyse und Optimierung jeder Produktlinie, wie das Kapitel „Grüne Chance und Gefahr“ detaillierter diskutiert.

Solarenergie

Solarenergie ist die erneuerbare Energie schlechthin. Ihre einfachste Form ist die Nutzung der Solarwärme durch Sonnenkollektoren, zunehmend eingesetzt zur Erwärmung von Brauchwasser für Haushalte oder öffentliche Räume wie Sporthallen und Schwimmbäder. Auf deutschen Dächern waren 2010 rund 14 Millionen Quadratmeter Kollektorfläche installiert [4].

Auch die solarthermische Stromerzeugung hat inzwischen den Sprung zur kommerziellen Nutzung im großen Maßstab geschafft (siehe auch Kapitel „Wie die Sonne ins Kraftwerk kommt“). Parabolrinnenkollektoren, Solartürme oder Paraboloidkraftwerke erzeugen Temperaturen bis über $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, die mit Hilfe von Gas- und Dampfturbinen in Strom verwandelt werden können. Diese Technologien könnten mittelfristig nennenswert zur Stromversorgung beitragen. Effizient sind sie allerdings nur in Ländern mit hoher Son-

neneinstrahlung wie in der gesamten Mittelmeerregion. Deutschland müsste Solarstrom aus solchen Kraftwerken also über ein Verbundnetz beziehen. Das könnte zunächst europäisch angelegt sein, langfristig könnten auch nordafrikanische Länder über eine Ringleitung um das Mittelmeer solarthermisch erzeugten Strom liefern (siehe auch das Kapitel „Strom aus der Wüste“) [11, 16, 17].

Die unmittelbarste und reizvollste Solarenergienutzung ist sicherlich die Photovoltaik. Der Photovoltaikmarkt zeigt derzeit das weitaus dynamischste Wachstum: Von 2000 (76 MW) bis 2010 (17 320 MW) stieg in Deutschland die installierte Peak-Leistung auf mehr als das 20-Fache. Dies entspricht einer Wachstumsrate von 72 % pro Jahr in diesem Jahrzehnt [4]. Neue Herstellungstechniken bieten zudem die Chance, Solarzellen wesentlich billiger und Energie sparer herzustellen und ihnen damit zum Durchbruch zu verhelfen (siehe Kapitel „Solarzellen – ein Überblick“, „Solarzellen aus Folien-Silizium“ und „Photovoltaik auf Glas“).

Geothermie

Die derzeit noch am wenigsten genutzte regenerative Ressource ist die Erdwärme. Vor allem die Tiefengeothermie nutzt bei Bohrungen von bis zu 5 km Tiefe entweder heiße Thermalwässer oder schafft durch die Injektion von Wasser in heiße, trockene Gesteinsschichten (Hot-Dry-Rock-Verfahren) eine hydraulische Stimulation (siehe Kapitel „Energie aus der Tiefe“). Bei Temperaturen über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann auch Strom erzeugt werden – in Deutschland zum Beispiel