

## Herausforderung Energie

**Max Planck Research Library  
for the History and Development  
of Knowledge**

**Series Editors**

Jürgen Renn, Robert Schlögl, Bernard F. Schutz.

**Edition Open Access Development Team**

Lindy Divarci, Beatrice Gabriel, Jörg Kantel, Matthias Schemmel, and Kai Surendorf, headed by Peter Damerow.

**Scientific Board**

Markus Antonietti, Ian Baldwin, Antonio Becchi, Fabio Bevilacqua, William G. Boltz, Jens Braarvik, Horst Bredekamp, Jed Z. Buchwald, Olivier Darrigol, Thomas Duve, Mike Edmunds, Yehuda Elkana, Fynn Ole Engler, Robert K. Englund, Mordechai Feingold, Rivka Feldhay, Gideon Freudenthal, Paolo Galluzzi, Kostas Gavroglu, Mark Geller, Domenico Giulini, Günther Görz, Gerd Graßhoff, James Hough, Manfred Laubichler, Glenn Most, Pier Daniele Napolitani, Alessandro Nova, Hermann Parzinger, Dan Potts, Circe Silva da Silva, Ana Simões, Richard Stephenson, Mark Stitt, Noel M. Swerdlow, Liba Taub, Martin Vingron, Scott Walter, Norton Wise, Gerhard Wolf, Rüdiger Wolfrum, Zhang Baichun.

**Proceedings 1**

**Edition Open Access  
2017**

# Herausforderung Energie

Ausgewählte Vorträge der 126. Versammlung der

Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte e.V.

herausgegeben von  
Jürgen Renn  
Robert Schlögl  
Hans-Peter Zenner

Edition Open Access  
2017

Max Planck Research Library  
for the History and Development of Knowledge  
Proceedings 1

*Lektoriert von Beatrice Gabriel*

Die Herausgeber:

*Prof. Dr. Jürgen Renn*  
*Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte*

*Prof. Dr. Robert Schlögl*  
*Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft (MPG)*

*Prof. Dr. Hans-Peter Zenner*  
*Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte e.V. (GDNÄ) Ärztlicher*  
*Direktor der Universitätsklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Tübingen*

ISBN 978-3-945561-18-8

Unveränderte Nachdruck der 1. Auflage 2011

Printed and distributed by

PRO BUSINESS digital printing Deutschland GmbH, Berlin

Edition Open Access

<http://www.edition-open-access.de>

Dieses Werk steht unter einer Creative Commons by-nc-sa 3.0

Deutsch-land Lizenz

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

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

Die Beiträge in diesem Band sind eine Vorab-Auskopplung aus dem 126. Versammlungsband der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte

„Herausforderung Mensch - Energie, Ernährung und Gesundheit“  
(Hrsg.: Hans-Peter Zenner u.a.), der am 5. Oktober 2011 im Georg Thieme Verlag, Stuttgart, erscheint ([www.thieme.de](http://www.thieme.de)).

Wir danken dem Georg Thieme Verlag für die freundliche Überlassung.

Die *Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge* besteht aus den Serien *Studies*, *Proceedings* und *Sources*. Forschungsergebnisse und relevante Quellen werden hier in einem neuen Format veröffentlicht, das die Vorteile der traditionellen Publikation mit denen des digitalen Mediums verbindet. Die Texte sind sowohl als gedruckte Bücher erhältlich als auch in einer Online-Version frei verfügbar. Es handelt sich um Originalveröffentlichungen wissenschaftlicher Arbeiten, die unter der Verantwortung von Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats und anderen Gutachtern vorgelegt werden.

Die Bände richten sich an Wissenschaftler und Studenten unterschiedlicher Disziplinen, sowie an all jene, die an der Rolle der Wissenschaft für die Gestaltung unserer Welt interessiert sind. Ziel der Serien ist es, wissenschaftliche Ergebnisse schnell und nach dem Open-Access-Prinzip zugänglich zu machen. Durch die Kombination von Buchdruck und digitaler Publikation bieten die Serien einen neuen Weg, Forschung im Wandel abzubilden und darüber hinaus ihre Quellen verfügbar zu machen.

Die vorliegende Initiative wird zur Zeit von drei Max-Planck-Instituten getragen: dem MPI für Wissenschaftsgeschichte, dem Fritz-Haber Institut der MPG und dem MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut). Sie wirkt im Sinne der *Berliner Erklärung über offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen*, die im Jahr 2003 von der Max-Planck Gesellschaft ins Leben gerufen wurde.

Die Bände der Serie *Studies* sind zentralen Themen der Geschichte und Entwicklung des Wissens gewidmet. Perspektiven aus unterschiedlichen Bereichen werden zusammengebracht, und auf Quellen gestützte empirische Forschung wird mit theoretisch ausgerichteten Ansätzen verknüpft. Die einzelnen Bände behandeln typischerweise neue, integrative Ansätze interdisziplinärer Forschergruppen. Sie berühren so unterschiedliche Themen wie die Globalisierung des Wissens oder die Entwicklung des räumlichen Denkens.

Die Bände der Serie *Proceedings* stellen die Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeitstreffen zu aktuellen Themen vor und sollen zugleich die weitere Kooperation zu diesen Themen durch das Angebot einer elektronischen Plattform unterstützen.

Die Bände der Serie *Sources* behandeln für die Geschichte und Entwicklung des Wissens wichtige Originalquellen, die als Faksimile, in Transkription oder Übersetzung verfügbar gemacht werden. Diese Primärquellen werden durch eine Einleitung und erläuternde Kommentare ergänzt. Beispiele sind historische Bücher, Manuskripte, Dokumente oder andere Materialien, die sonst nur schwer zugänglich sind.

Das traditionelle Buch, in Print-on-Demand Technologie hergestellt, wird mit den Möglichkeiten der modernen Informationstechnologie zusammengebracht, um ein neuartiges Forum für wissenschaftliche Kommunikation zu schaffen. Auf der Grundlage der digitalen Bibliothek der *European Cultural Heritage Online (ECHO)* Initiative soll somit eine wissenschaftliche Arbeitsumgebung entstehen, die den ungehinderten Zugang zu Information mit interaktiven Bearbeitungsmöglichkeiten verbindet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	1
<b>Die Herausgeber und Autoren</b> .....	3
<b>Vorträge</b> .....	5
<b>1 Die Energiewende 2011 in Deutschland: Ein Vademecum für die Diskussion?</b>	
<i>Robert Schlögl</i> .....	7
1.1 Zur Situation .....	7
1.2 Einige Grundlagen .....	8
1.3 Der große Blick .....	12
1.4 Die Situation in Deutschland .....	17
1.5 Folgen einer Entscheidung für den Ausstieg .....	22
1.6 Die längerfristige Zukunft und die Rolle der Forschung .....	27
1.7 Nachwort .....	35
<b>2 Smarte Ideen für zukünftige Stromnetze</b>	
<i>Christian Rehtanz</i> .....	39
2.1 Kurzfassung .....	39
2.2 Energieträger Strom .....	39
2.3 Anforderungen an Stromnetze .....	40
2.4 Innovationen gegen Netzengpässe .....	42
2.5 Netzintegration von Windenergie .....	47
2.6 Innovationen für eine dezentrale Energieversorgung .....	48
2.7 Zusammenfassung .....	51
<b>3 Energie aus der Tiefe: Geothermie</b>	
<i>Rüdiger Schulz</i> .....	53
3.1 Geothermische Energie weltweit .....	53
3.2 Geothermische Energie als heimische Energiequelle .....	53
3.3 Hydrogeothermische Systeme .....	60
3.4 Petrothermale Systeme .....	62
3.5 Ausblick .....	65

<b>4</b>	<b>Forschung zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle</b>	
	<i>Tilmann Rothfuchs, Thomas Brassler, Horst-Jürgen Herbert, Jörg Mönig, Ingo Müller-Lyda</i> .....	69
4.1	Einleitung .....	69
4.2	Sicherheitskonzept .....	70
4.3	Geeignete geologische Formationen in Deutschland .....	72
4.4	Endlagerstandorte in Deutschland .....	74
4.5	Endlagerforschung in Deutschland .....	76
4.6	Endlagerforschung international .....	84
4.7	Ausblick .....	86
<b>5</b>	<b>Chancen und Risiken der CO<sub>2</sub>-Speicherung</b>	
	<i>Michael Kühn</i> .....	93
5.1	Einleitung .....	93
5.2	Geowissenschaftliche Grundlagen .....	94
5.3	Pilotstandort Ketzin .....	102
5.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	105
<b>6</b>	<b>Perspektiven für eine effiziente und nachhaltige Mobilität</b>	
	<i>Rolf Scharwächter</i> .....	109
6.1	Bedeutende Trends mit Wirkung auf die Mobilität .....	110
6.2	Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsträger als Mittel der Mobilität .....	113
6.3	Personenwagen und Nutzfahrzeuge als vorherrschende Verkehrsträger, ihre Antriebstechnologien .....	115
6.4	Wertung und Ausblick .....	119
<b>7</b>	<b>Stromimport aus der Sahara: Grundlagen des DESERTEC Konzepts</b>	
	<i>Franz Trieb und Hans Müller-Steinhagen</i> .....	123
7.1	Kurzfassung .....	123
7.2	Einleitung .....	123
7.3	Strom- und Wasserbedarf nehmen zu .....	125
7.4	Verfügbare technische Optionen .....	130
7.5	Die Rolle solarthermischer Kraftwerke .....	136
7.6	Nachhaltige Energie- und Wasserversorgung für EU-MENA ..	136
7.7	Kostengünstiger Strom aus erneuerbarer Energie .....	147
7.8	Eine Alternative zu Klimawandel und Kernenergie .....	151
7.9	Elektrizität in anderen Energiesektoren .....	153

7.10	Schlussfolgerungen.....	154
<b>8</b>	<b>Energie ist Chemie – Katalyse als Schlüsseltechnik. Energie von Morgen: Eine Momentaufnahme</b>	
	<i>Malte Behrens und Robert Schlögl.....</i>	163
8.1	Das Energieproblem.....	163
8.2	Die Dimension der Herausforderung.....	164
8.3	Der Status Quo.....	165
8.4	Nutzung von regenerativen Energien.....	167
8.5	Speicherung regenerativer Energie.....	168
8.6	Chemische Energiespeicher als Lösungsansatz.....	171
8.7	Katalyse als Schlüsseltechnik.....	173
8.8	Zusammenfassung.....	174
	<b>Mittagsymposium: Dolmetscher der Kulturen</b>	
	Energie zwischen Natur- und Geisteswissenschaften	
	Ein Streitgespräch.....	175
<b>9</b>	<b>Einleitung</b>	
	<i>Gerhard Schaefer.....</i>	179
<b>10</b>	<b>Verschiedene Sprachkulturen rund um <i>Energie</i></b>	
	<i>Gerhard Schaefer.....</i>	183
<b>11</b>	<b>Zitate zur Anregung der Diskussion</b>	
	<i>Gerhard Schaefer.....</i>	187
11.1	Physik.....	187
11.2	Biologie.....	187
11.3	Chemie.....	188
11.4	Psychologie.....	188
11.5	Musik.....	188
11.6	Literatur.....	188
11.7	Presse.....	189
11.8	Physiotherapie.....	189
11.9	ZEN-Meditation.....	189
11.10	Philosophie, Ethik, Bildung.....	189
11.11	Schüleräußerungen zum Energiebegriff (Gymnasium, Kl. 10-13).....	190

<b>12</b>	<b>Reaktionen der zwei Kontrahenten im Streitgespräch</b> .....	193
12.1	Der Begriff <i>Energie</i> aus geisteswissenschaftlicher Sicht <i>Dietrich v. Engelhardt</i> .....	193
12.2	Der Begriff <i>Energie</i> aus naturwissenschaftlicher Sicht <i>Gunnar Berg</i> .....	197
<b>13</b>	<b>Fazit</b> <i>Gerhard Schaefer</i> .....	203





## Vorwort

Die Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte (GDNÄ) macht es sich zur Aufgabe, als älteste wissenschaftliche Fachgesellschaft Erkenntnisse und Entwicklungen in der Wissenschaft jenseits disziplinärer Grenzen zu diskutieren und in die Allgemeinheit zu vermitteln. In diesem Geiste wurde die Versammlung des Jahres 2010 in Dresden unter dem Präsidium von Hans-Peter Zenner auch dem Querschnittsthema “Energie” in seinen vielen Facetten gewidmet.

Wie üblich werden die Ergebnisse der Versammlungen in entsprechenden Bänden gesammelt und dauerhaft zugänglich gemacht. Somit lag der Gesellschaft im Frühjahr 2011 eine Reihe von Aufsätzen zum Thema Energie vor, die exakt in die Diskussion zum Atommoratorium, das infolge der Naturkatastrophe und ihren Folgen in Japan von der Bundesregierung ausgesprochen wurde, passen.

Es lag nahe, dass der Vorstand der GDNÄ im April 2011 beschloss, eine Auswahl dieser Manuskripte ergänzt um eine Einführung in Elemente der aktuellen Diskussion zusammenzufassen und in einer Auskopplung des Tagungsbandes, der weiter in gewohnter Form vorgelegt wird, zeitnah allgemein verfügbar zu machen. Die Herausgeber danken den Autoren für ihre Zustimmung zu diesem Vorgehen.

Der Inhalt des Bandes soll helfen, allgemein verständlich zu machen, dass Entscheidungen zur Struktur der Energieversorgung von enormer Tragweite und Komplexität sind. Die Reduktion auf sehr einfache Alternativen verschweigt die Konsequenzen, welche oftmals nicht unmittelbar im Zusammenhang der zur Entscheidung anstehenden Fakten spürbar werden.

Dies wurde in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft, die auch die Kosten der Produktion dieser Publikation trägt, umgesetzt. Dort existiert eine Schriftenreihe, welche interdisziplinäre Themen in anspruchsvoller Form im Internet unter der Open-Access-Verpflichtung der Max-Planck-Gesellschaft zugänglich macht. Gleichzeitig können die Werke im Buchhandel in gewohnter Form preisgünstig erworben werden. Es ist ausdrücklich erwünscht, diese Werke der wissenschaftlichen Nachnutzung auf breiter Basis zugänglich zu machen. Jürgen Renn hat sich bereit erklärt, den vorliegenden Band mit herauszugeben. Dabei mussten aus Gründen

der Aktualität einige formale Beschränkungen in Kauf genommen werden, wie eine Beschränkung auf Beiträge in deutscher Sprache. Der Band erscheint sowohl in einer Schwarz-Weiß-Ausgabe als auch in Farbe.

Der Georg Thieme Verlag als Besitzer der Rechte an den Beiträgen hat sich dankenswerterweise ohne Zögern bereit erklärt, dieser Auskopplung der Beiträge zuzustimmen.

Nur durch die sehr fachkundige und mit extremem Einsatz geleistete Editionsarbeit von Peter Damerow und seinem Team, insbesondere von Beatrice Gabriel, war es möglich, diesen Band so rechtzeitig vorzulegen, dass er noch in die Diskussion um die Folgen des Moratoriumsbeschlusses Eingang finden kann.

Die Herausgeber danken weiter allen, die an diesem Projekt beteiligt waren für die konstruktive und ungewöhnlich engagierte Mitarbeit. Namentlich gilt unser Dank Kerstin Grigoleit von der GDNÄ und Dorothea Damm von der MPG.

Berlin und Tübingen, im Mai 2011

Jürgen Renn  
Robert Schlögl  
Hans-Peter Zenner

## Die Herausgeber und Autoren

*Dr. Malte Behrens*, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Abteilung Anorganische Chemie, Berlin.

*Prof. Dr. Dr.-Ing. Gunnar Berg*, ehemals Professor für Experimentalphysik und Leiter der Fachgruppe Experimentelle Physik I „Glasphysik“ an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; seit 2010 Vizepräsident der Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften.

*Univ.-Prof. Dr. phil. Dietrich von Engelhardt*, Medizinhistoriker und Medizinehiker. Direktor des Instituts für Medizin- und Wissenschaftsgeschichte der Universität zu Lübeck; Präsident der Akademie für Ethik in der Medizin.

*PD Dr. Michael Kühn*, Geochemiker/Geologe/Hydrologe. Seit 2009 Leiter des Zentrums für CO<sub>2</sub>-Speicherung am Deutschen GeoForschungsZentrum in Potsdam.

*Prof. Dr. Dr.-Ing. Hans Müller-Steinhagen*, seit 2010 Rektor der Technischen Universität Dresden, zwischen 2000 und 2010 in Personalunion Direktor des Instituts für Technische Thermodynamik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik an der Universität Stuttgart. Vorsitzender des Beirates der Desertec Industrial Initiative (Dii).

*Prof. Dr. Jürgen Renn*, Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin, Honorar Professor für Wissenschaftsgeschichte an der Humboldt-Universität Berlin, Honorar Professor für Physik an der Freien Universität Berlin, Dozent für Philosophie und Physik an der Boston University.

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz*, seit 2007 Leiter des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft der Technischen Universität Dortmund. Wissenschaftlicher Sprecher der ef.Ruhr, einem Zusammenschluss von 40 energietechnisch forschenden Lehrstühlen und Instituten der Universitäten Bochum, Dortmund und Duisburg-Essen (Universitätsallianz Metropole Ruhr).

*Tilman Rothfuchs, Thomas Brasser, Horst-Jürgen Herbert, Jörg Mönig, Ingo Müller-Lyda.* Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bereich Endlagersicherheitsforschung, Braunschweig.

*Prof. Dr. Gerhard Schaefer,* Biologe, FB Erziehungswissenschaft der Universität Hamburg, Bildungsbeauftragter der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, von 1993 bis 1996 Präsident des VBIO (Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin).

*Prof. Dr. Rolf Scharwächter,* ehemaliges Vorstandsmitglied der Daimler-Benz AG, Honorarprofessor an der Universität Karlsruhe und Lehrbeauftragter an der BTU Cottbus.

*Prof. Dr. Robert Schlögl,* Direktor am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Abteilung Anorganische Chemie, Berlin. Er ist einer der Initiatoren des Forschungsverbundes EnerChem, in dem verschiedene Max-Planck-Institute Lösungen zur zukünftigen Energieversorgung, -speicherung und -einsparung erforschen. Er ist Mitglied in zahlreichen in- und ausländischen Gremien.

*Prof. Dr. Rüdiger Schulz,* Direktor am Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Bereich Geothermik und Informationssysteme, Hannover. Vizepräsident des Bundesverbandes Geothermie und Sprecher der Sektion Geothermische Vereinigung.

*Dr. Franz Trieb,* Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart.

*Prof. Dr. Hans-Peter Zenner,* seit 1988 Direktor der Universitäts-Hals-Nasen-Ohrenklinik Tübingen und war 2009 bis 2010 Präsident der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte und Vorsitzender der im September 2010 stattgefundenen 126. Versammlung in Dresden. Er ist Mitglied des Präsidiums der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Ehrenmitglied mehrerer ausländischer Fachgesellschaften.

## Vorträge



## Kapitel 1

# Die Energiewende 2011 in Deutschland: Ein Vademecum für die Diskussion?

*Robert Schlögl*

Der vorliegende Text soll Unterstützung in der Diskussion des Jahres 2011 um die Struktur der deutschen Energieversorgung geben. Er sammelt ausgewählte grundlegende Fakten und versucht, einige Argumente zu strukturieren. Der Text wurde aus der Erfahrung vieler Diskussionen verfasst und ist keine wissenschaftliche Expertenstudie. Er erhebt auch keinen Anspruch auf umfassende Darstellung und beschränkt sich weitgehend auf wissenschaftlich-technische Aspekte.

Als Quellen wurden allgemein zugängliche Datenbasen des BMWI und BDEW verwendet. Die Zahlen sind nicht aktuell, aber allgemein durch das Internet verfügbar. Die Abschätzungen im Text sind pauschal und berücksichtigen nicht einige komplexe Zusammenhänge, die in der Kürze der Zeit nicht recherchierbar waren. Sie geben aber ein Gerüst quantitativer Zusammenhänge, welche in der aktuellen Diskussion hilfreich sein können.

### 1.1 Zur Situation

Die Diskussion über unsere Energieversorgung ist nicht neu. Seit Jahrzehnten wird darüber aus wechselnden Anlässen diskutiert. Das Atommoratorium der Bundesregierung hat uns in die Lage gebracht, zur Zusammensetzung unserer Energieversorgung und ihrer zeitlichen Entwicklung über 10 Jahre eine verbindliche Entscheidung zu treffen. Diese Entscheidung läuft auf einen definitiven Ausstieg aus der Atomspaltung in einem festgelegten Zeitraum hinaus. Hintergrund dieser Entscheidung ist vor allem ein in Deutschland gefühltes Unbehagen und nicht eine konkrete Notwendigkeit. Die Konsequenzen dieser Entscheidung sind durchaus nicht allgemein klar. Es werden die Szenarien Ersatz durch regenerative Energie, Inkaufnahme von vermehrter Emission von Treibhausgasen und Sparen bzw. Management von Energie diskutiert.

Der vorliegende Beitrag gibt zunächst einige Fakten zu den „Szenarien“ und beleuchtet dann die Hypothese, dass es einer Mischung aus allen Szenarien bedarf, wenn man schnell aus der Atomspaltungsenergie aussteigen will. Nicht weiter diskutiert wird hier, dass wir dadurch die Legitimation verlieren, unsere hervorragende Sicherheitstechnik und wissenschaftliche Nuklearkompetenz international zum Tragen zu bringen und dass wir die Gefahr der Radioaktivität in Mitteleuropa nicht entscheidend verringert haben. Auch nicht weiter diskutiert wird die Vorbildwirkung dieser Entscheidung auf andere Länder, sowohl in positiver wie in negativer Hinsicht.

Eine Besonderheit der nationalen Energiediskussion ist, dass sie von uns gewollt ist und keinen Entscheidungsdruck durch Fakten als Ursache hat. Darin liegt auch eine Chance. Denn es ist absehbar dass dieser „Luxus“ einer selbstbestimmten Entscheidungslage nicht mehr existieren wird, wenn es zu stofflichen Engpässen an fossilen Energieträgern kommen wird. Dann müssen wir mit wesentlich weniger Optionen entscheiden, obwohl die gleichen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Werte zur Debatte stehen. Zusätzliche Optionen können wir uns auf dem Feld der Technologien erarbeiten. Daher wird eine Kernthese der vorliegenden Betrachtung sein, dass wir ausgehend von den aktuellen Erfahrungen eine umfangreiche und nachhaltige Anstrengung in der Entwicklung und Forschung für neue Energietechnologien unternehmen sollten.

## 1.2 Einige Grundlagen

Die Energieversorgung ist eine strategische Grundlage jeder Zivilisation. Ihre Sicherstellung ist eine zentrale Aufgabe der Daseinsgestaltung und Zukunftsvorsorge und sollte den gleichen Rang wie traditionelle Politikfelder in einer Gesellschaft genießen. Ihre Strukturierung ist ein vielschichtiges Problem, das sich durch viele Gebiete der Wissenschaft zieht. Zu den offensichtlichen Komponenten Wissen und Technologie gesellen sich eine Komponente wirtschaftlicher und politischer Randbedingungen sowie eine Komponente gesellschaftlichen Wissens und Akzeptanz. Alle drei Felder sind vielfach verknüpft. Die Entwicklungen sind wegen der ungeheuren wirtschaftlichen Dimensionen (in Einheiten des Bruttosozialproduktes) und den langen Zeiträumen (in vielen Legislaturperioden) einer Umsteuerung nur schwer für den Einzelnen und den kurzfristigen Entscheider zu überblicken. Man tendiert daher leicht zu fragmentarischen Betrachtungen, die auch durch Szenarien, welche von unvollständigen Annahmen und Parametern ausgehen, nicht grundsätzlich verbessert werden. Dage-

gen vermögen kontinuierliche Prozesse systemischer und interdisziplinärer Beratung uns zu belastbaren und langfristig orientierten Entscheidungen führen. Den Wissenschaften und im Besonderen der Grundlagenforschung kommt dabei die Funktion zu, Optionen für Entscheidungen bereitzustellen und ihre Bewertung durch eine gesicherte Erkenntnisbasis für die technologischen Aspekte zu gewährleisten. Zu dieser Aufgabe gehört auch eine geeignete Vermittlung von Fakten und Randbedingungen.

Grundsätzlich kann man Energie nicht erzeugen, sondern nur zwischen unterschiedlichen Energieträgern umwandeln. Ein Kraftwerk erzeugt keine Energie oder „Strom“, sondern wandelt chemische oder nukleare Energie in elektrische Energie um. Ein Verbrennungsmotor wandelt chemische Energie aus dem Treibstoff durch Oxidation mit Luftsauerstoff in mechanische Energie der Bewegung um. Grundsätzlich entstehen bei allen Energiewandlungsprozessen Verluste, die sich in „Abwärme“ äußern. Diese Verluste können sehr erheblich sein, wie in Glühlampen, in denen über 95 % der eingespeisten Energie in Wärme und nur ein geringer Teil in sichtbares Licht umgewandelt werden. Das Verhältnis aus eingesetzter Energie und erhaltener (Nutz)Energie nennt man den Wirkungsgrad, der als dimensionslose Zahl zwischen 0 (völliger Verlust) und 1 (völlige Umwandlung) variieren kann. Er wird oft in % der eingesetzten Energie angegeben.

Die (elektrische) Leistung ist der Quotient aus Energie und Zeitdauer: 1 kWh entspricht der Nutzung von 1 kW Energie innerhalb einer Stunde. Nutzt man dieselbe Leistung innerhalb von 0,5 h, benötigt man 2 kW Energie. Für zeitlich variable Leistungen gilt die Definition nur für sehr kurze Zeitintervalle und man muss die mittlere Leistung als sinnvolle Kenngröße einführen. Dabei kann die benötigte Spitzenleistung erheblich von der mittleren Leistung abweichen. Fordert man Versorgungssicherheit, muss die Spitzenleistung zu jedem beliebigen Zeitpunkt verfügbar sein.

Im privaten Bereich ist die sinnvolle Leistungseinheit das Kilowatt (kW) und die entsprechende Energieeinheit die Kilowattstunde (kWh). Meist betrachtet man dabei die Daten in zeitlich gemittelter Form. Auf der Ebene von Volkswirtschaften benutzt man als Leistungseinheit das GW (Gigawatt: Millionen Kilowatt) und als Energieeinheit die TWh (Terawattstunden: Billionen Kilowattstunden). Dabei verwendet man als Zeiteinheit oft das Jahr, welches mit 8760 h die Werte für die Leistung um drei Größenordnungen in die Energie übersetzt.

Nur etwa die Hälfte der Energie wird bei uns als elektrische Energie genutzt. Die andere Hälfte steht in Form unterschiedlicher stofflicher Energieträger zur Verfügung. Diese sind Kohle, Biomasse, Erdöl, Erdgas, Raffinerieprodukte wie Benzin und Diesel sowie Wasserdampf (Fernheizung).

Für ihre Zählung verwendet man andere Einheiten, von denen einige sowie deren Umrechnung in TWh, die hier als Bezugseinheit benutzt wird, in Tabelle 1.1 angegeben sind.

Tabelle 1.1: Einige Einheiten für Energie und Leistung und ihre Umrechnungsfaktoren auf TWh

<i>Name</i>	<i>Benennung</i>	<i>Umrechnung auf TWh</i>
1 Peta Joule	PJ	0,278
1 Mio t Steinkohleeinheiten	SKE	8,14
1 Mio t Rohöleinheiten	ROE	11,63
1 Mrd Kilokalorien	kcal	0,001163

Die enorme Größe dieser Einheiten vermag man abzuschätzen, wenn man bedenkt, dass 1 Mrd kcal ausreichen, um 140 Menschen für ein Jahr zu ernähren. 1 Mio t SKE ist demnach äquivalent zum Energiegehalt der Nahrung für 130.000 Menschen für ein Jahr.

In der Energiediskussion wird nicht immer scharf zwischen den Begriffen „installierte Leistung“ und „abgegebene Leistung“ unterschieden. Die installierte Leistung bezeichnet ein theoretisches Maximum, die abgegebene Leistung die unter realistischen Bedingungen verfügbare Leistung. Ein kohlebefeuerter Kraftwerk mit 1 GW Leistung beispielsweise könnte maximal 8,76 TWh Energie abgeben. Da es im Mittel nur über 40 % des Jahres in Betrieb ist, reduziert sich seine Energieabgabe auf etwa 3,5 TWh. Bei regenerativen Kraftwerken reduziert sich die erzeugte Energie erheblich weiter, da Sonne und Wind nicht den ganzen Tag über verfügbar sind. Ein typischer Wert bei uns ist etwa 15 %, weshalb man zum Ersatz einer fossilen oder nuklearen Energieumwandlungsanlage mit 40 % Nutzungsdauer durch regenerative Anlagen etwa die 2-3fache Erzeugungskapazität benötigt. Die Werte der Verfügbarkeit schwanken allerdings erheblich mit der Art der Kraftwerke. Die folgende Tabelle 1.2 gibt bezogen auf die hypothetische Volllast zur Orientierung einige Zahlen.

Man erkennt deutlich, dass die Kernenergie und die Braunkohle vor allem die sogenannte Grundlast, das ist die kontinuierlich über alle 8760 Stunden im Jahr benötigte Leistung, erbringen, während aus unterschied-

Tabelle 1.2: Nutzungsdauer von Kraftwerkstypen im Jahr 2007 (BDEW)

<i>Kraftwerksart</i>	<i>Volllastnutzung in Stunden</i>
Kernkraft	7710
Steinkohle	3650
Braunkohle	6640
Erdgas	3170
Erdöl	1640
Wind	1550
Speicherwasser	970
Photovoltaik	910

lichen Gründen die anderen Arten der Energiewandlung weniger lang dauernd benutzt werden.

Weiterhin ist bei den Leistungsdaten darauf zu achten, ob man von elektrischer oder thermischer Leistung spricht. Zwischen diesen beiden Größen besteht ein erheblicher Unterschied, da man thermische Leistung (fossil oder nuklear) nur mit erheblichen Verlusten in elektrische Leistung umwandeln kann. Für den Wirkungsgrad gilt als Richtwert 30 %, das bedeutet, dass man für eine bestimmte elektrische Leistung etwa die dreifache thermische Leistung aufwenden muss. Daraus ergibt sich sofort, dass die Nutzung elektrischer Energie zu Wärmезwecken wie Kochen, Heizen oder Warmwasserbereitung eine sehr ungünstige Verwendung von Energie ist. Deutsche Kraftwerke sind in ihrem Wirkungsgrad im Laufe der Zeit deutlich besser geworden, wie folgende Tabelle 1.3 zeigt. An den Daten erkennen wir, dass es sehr wohl sinnvoll sein kann, noch vorhandene alte Kraftwerke durch moderne mit erhöhtem Wirkungsgrad zu ersetzen. Zudem sehen wir, dass durch Forschung und Entwicklung noch Steigerungen in der Ausnutzung der Primärenergieträger bei der Wandlung zu elektrischem Strom möglich sind. Man findet Angaben, dass Werte bis zu 50 % möglich sein könnten.

Tabelle 1.3: Wirkungsgrad deutscher fossiler Kraftwerke (Quelle: BDEW 2010)

<i>Jahr</i>	<i>Wirkungsgrad</i>
1950	20
1960	28
1970	33
1980	35
1990	35
2000	36
2005	38

### 1.3 Der große Blick

Diskussionen um das Energiesystem sollten mit dem Blick auf die Weltlage beginnen. Der Energieverbrauch steigt global stark an. In den OECD-Ländern ist der Verbrauch in etwa konstant. Die Sparbemühungen durch effizientere Technologien und den regionalen Wegfall energieintensiver Produktion werden durch den spezifischen Zuwachs des Energiekonsums ausgeglichen. In den asiatischen Ländern China und Indien wächst der Energiekonsum enorm. Als Abschätzung mag dienen, dass der Gesamtprimärenergieverbrauch in Deutschland etwa der jährlichen Steigerung des Energieverbrauchs in China entspricht.

Im Jahre 2006 lag der Primärenergieverbrauch weltweit bei 136.498 TWh. Dies entspricht einer hypothetischen konstanten Leistung von 15,6 TW. Die Leistung, welche die Natur in Form von Nahrungsmitteln aufbringen muss, um alle Menschen zu ernähren, ist etwa 25 TW entsprechend etwa 10 % der Leistung der gesamten lebenden Materie auf der Erde. Wir erkennen, dass wir durch die Nahrungsmittelproduktion bereits einen erheblichen Anteil der Biomasse der Erde nutzen. Es wird diskutiert, dass der Anteil der Energiewandlungsleistung der Biomasse, die wir durch kontrollierte Ökosysteme nutzen können, etwa bei 25 % liegt. Bedenkt man, dass sich die Weltbevölkerung in den kommenden 50 Jahren wohl noch verdoppeln wird, so sehen wir, dass die Biomasse nicht in der Lage sein wird, einen wesentlichen Anteil unseres Energiebedarfs zu decken, ohne dass wir in Ge-

fahr laufen, die globalen Ökosysteme zu übernutzen. Die Verfügbarkeit von ausreichend Wasser und Nährstoffen, die wir für kontrollierte Ökosysteme benötigen, wird hier nicht behandelt, muss aber zwingend bedacht werden, wenn man biologische Energieerzeugung im großen Stil einführen will.

In Abbildung 1.1 ist die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit dargestellt. Dazu werden alle fossilen und nuklearen Energieträger rechnerisch auf eine gemeinsame Einheit bezogen. Wir können nicht erwarten, dass sich der Energieverbrauch in naher Zukunft reduzieren könnte.

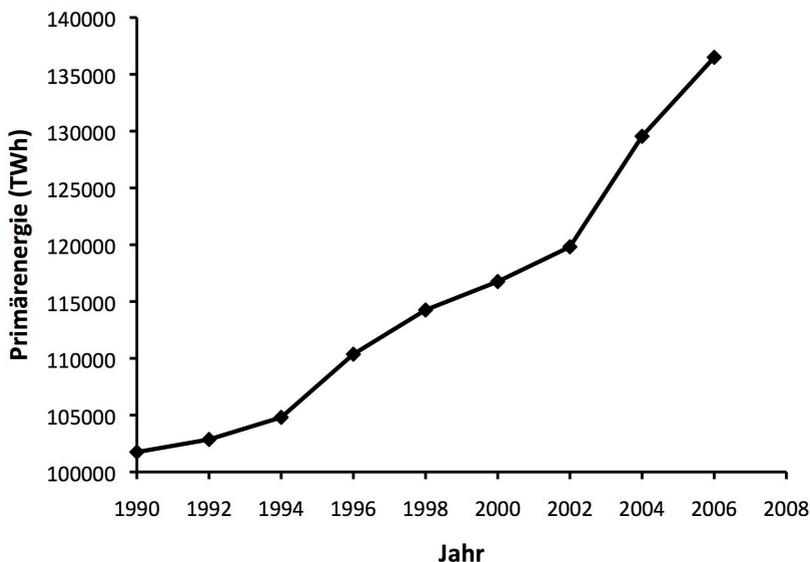


Abbildung 1.1: Zeitliche Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit. Einheit ist TWh (Quelle nach BMWI)

In Abbildung 1.2 ist der Verbrauch von 2006 regional aufgeschlüsselt. Wir erkennen drei große Blöcke für USA, China und die EU (27 Mitglieder). Ungeachtet der großen Einwohnerzahl sind Afrika und Indien deutlich geringere Verbraucher. Danach folgen Japan und zum Vergleich Deutschland und Frankreich. Der Anteil Australiens gibt in etwa die Auflösungsgrenze dieser Betrachtung an.

Beziehen wir die absoluten Energieverbrauchswerte auf die Bevölkerungszahl, so erkennen wir die Brisanz der Lage in Asien. Für Deutschland

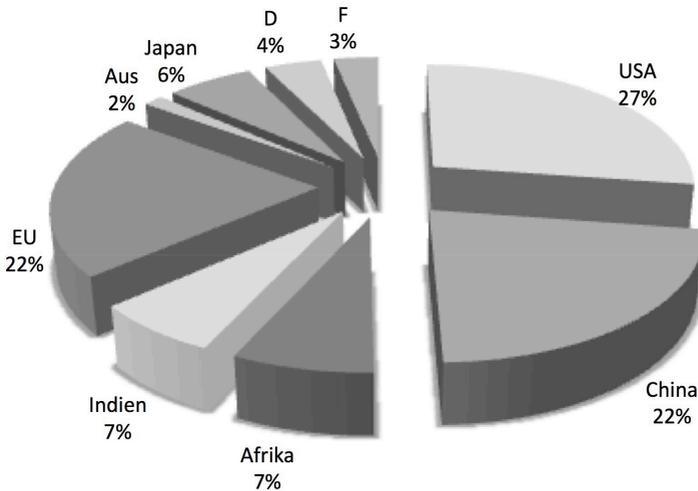


Abbildung 1.2: Primärenergieverbrauch in 2006 nach Regionen. (Quelle BMWI)

ergibt sich eine besondere Bedeutung seiner Energiepolitik aus der Möglichkeit, mit effizienten Technologien zur Energiewandlung in den Wachstumsregionen einen Einspareffekt bei Primärenergie zu erreichen, der wesentlich bedeutender ist, als alle Effekte, die wir im eigenen Land realisieren können. Voraussetzung ist aber, dass wir unser Land als Modellfall entsprechend aufstellen, da derartige Technologien nur durchsetzbar sind, wenn wir selbst ihren Nutzen demonstrieren.

Der Primärenergieverbrauch ist eng an die Emission von Treibhausgasen gekoppelt, da der allergrößte Anteil der Energieträger fossiler Natur ist. Energieversorgung und Klimafragen sind extrem eng aneinander gekoppelt und können als zwei Seiten der Nutzung fossiler Energieträger betrachtet werden. Selbst ohne Klimaschädigung wird jedoch die Endlichkeit vernünftig verfügbarer fossiler Ressourcen das Auftreten von „Energiewenden“ bedingen. Dies dürfte regional und zeitlich gestaffelt erfolgen, da die jeweiligen Anteile unterschiedlicher fossiler Energieträger zur Energieversorgung regional verschieden sind. Die Welt emittierte im Jahre 2005 28,2 Mrd. t CO<sub>2</sub>. Vergleicht man die regionale Aufteilung aus Abbildung 1.3 mit den Daten aus Abbildung 1.2, so wird der enge Zusammenhang von Klimafragen und Energieversorgung augenscheinlich.

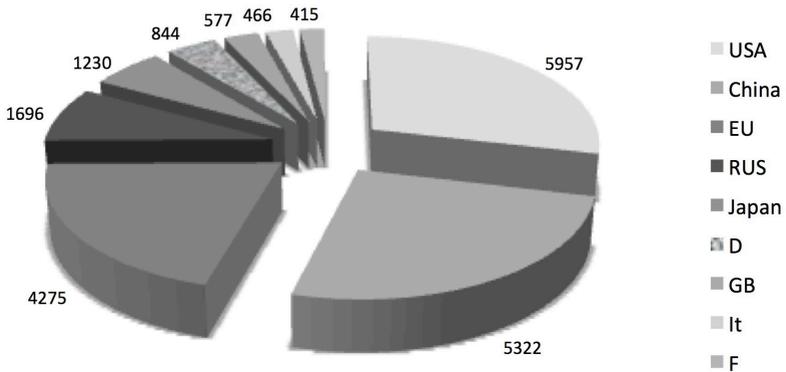


Abbildung 1.3: Emission von Kohlendioxid im Jahre 2005 nach Regionen. Angaben in Mio t (Quelle BDEW 2010)

Rechnet man diese Daten in einen pro-Kopf-Anteil um, ergeben sich etwas andere Zahlen, bei denen die USA, EU und Luxemburg mit hohen Werten (20 t/Jahr und Einwohner) auffallen, während erwartungsgemäß die asiatischen Länder und Afrika mit sehr reduzierten Werten unter 5 t pro Jahr und Einwohner den Nachholbedarf dieser Regionen verdeutlichen. Deutschland und Japan liegen mit etwa 10 t pro Jahr und Einwohner in der Mitte des Wertebereichs. Aus dieser Betrachtung ergibt sich, dass in der Tat insbesondere die USA einen besonders hohen absoluten und relativen Anteil am Energieverbrauch und den Treibhausgasemissionen aufweisen. Somit werden Effizienzsteigerungen in den USA auch mit Abstand den größten absoluten Einsparwert erbringen. Die anderen Hochemissionsländer sind absolut gesehen regionale Verbraucher und Verursacher und können zwar viele Emissionen in relativer Hinsicht sparen, aber dies würde sich nur nachgeordnet auf die Gesamtemission auswirken. Die Hochtechnologieländer Japan und Deutschland haben offenbar schon erhebliche Effizienzsteigerungen erreicht, woraus folgt, dass substantielle Einsparungen dort mit erheblich höherem Aufwand belegt sind. Es wird einer Kombination aus erheblichen technologischen Fortschritten und gesellschaftlich-

politischen Entscheidungen bedürfen, um eine Profilländerung des Energieverbrauchs zu bewirken und um die Emissionen wesentlich reduzieren zu können. Genau dies ist in den Rahmendaten des deutschen Energiekonzepts niedergelegt. Es erscheint wenig glaubwürdig, diese Ziele wesentlich höher zu stecken oder ihre schnellere Erreichbarkeit einzufordern.

Die Zahlen in Abb. 1.3 geben nicht mehr den sich aktuell stark verändernden Trend richtig wieder, nach dem die Emissionen allgemein wachsen, aber sich in den asiatischen Ländern drastisch erhöhen. In Deutschland können wir von einem Emissionswert von etwa 1000 Mio t/Jahr CO<sub>2</sub> für 2010 ausgehen.

Kehren wir noch einmal zum europäischen Energieverbrauch zurück. In Tabelle 1.4 werden einige End-Energieverbrauchswerte für EU Länder absolut und als pro-Kopf-Zahlen verglichen.

Tabelle 1.4: Ausgewählte End-Energieverbrauchswerte für Europäische Länder für 2008. (Quelle: Wirtschaftskammer Österreich)

<i>Land</i>	<i>Gesamtenergieverbrauch (TWh)</i>	<i>Energieverbrauch pro Kopf (MWh)</i>
EU gesamt	13584	27,2
Deutschland	2605	31,7
Frankreich	1814	28,4
Großbritannien	1733	28,1
Dänemark	186	32,9
Österreich	314	37,7
Schweiz	260	- - -

Aus diesen Werten sind die Umwandlungsverluste von primären Energieträgern zu Endenergieträgern herausgerechnet. Wir verwenden diese Werte, da in der folgenden Diskussion die Frage der Stromversorgung im Mittelpunkt stehen wird. Strom ist heute weitgehend eine Endenergie, die aus Primärträgern (fossil, nuklear, Biomasse) erzeugt wird. Dies ändert sich langsam mit dem Aufkommen regenerativer Stromerzeugung, die Solarenergie direkt in Strom umwandelt.

Aus dem Mittelwert des pro-Kopf-Verbrauchs ergibt sich, dass ein Europäer etwa einen Leistungsverbrauch von 3,7 kW bei hypothetischer glei-

cher Belastung über die Zeit aufweist. Dieser Wert soll als Orientierung dienen. Eine detaillierte Interpretation erweist sich wegen der unterschiedlichen Strukturen und Leistungsvermögen der Volkswirtschaften und der vielfältigen darin vorherrschenden Einflüsse, welche jeweils von besonderer Bedeutung sind, als sehr anspruchsvoll. Es wird wieder deutlich, dass Deutschland im Vergleich bereits viel für eine effiziente Nutzung von Energie getan hat und für weitere substantielle Verbesserungen nur ein enger Spielraum besteht, wenn man einen Planungszeitraum von 10 Jahren betrachtet.

Wir fokussieren nun weiter auf den Endenergiebereich und betrachten die Verwendung von verschiedenen Energieträgern für die Stromerzeugung in Europa. Die naheliegende Vorstellung von einem gemeinsamen europäischen Stromversorgungsgebiet mit möglichst einheitlicher Infrastruktur würde Maßnahmen zur Risikominimierung und Effizienzsteigerung sehr vereinfachen. Die Daten aus Abbildung 1.4 zeigen allerdings, dass diese Vorstellung in keiner Weise den gegenwärtigen Realitäten entspricht, sondern vielmehr, dass sehr unterschiedliche Strukturen der Stromerzeugung in Europa existieren.

Die Verwendung von Kernspaltungsenergie ist offenbar sehr unterschiedlich weit verbreitet, ebenso wie der Ausbaustand von regenerativen Energiequellen. Manche Vorstellungen über die Energieversorgung in anderen europäischen Ländern in der laufenden Energiediskussion relativieren sich bei Betrachtung der Daten aus Abbildung 1.4. In der Kategorie „fossil“ sind Öl, Gas und Kohlen sehr unterschiedlich vertreten, woraus sich unterschiedliche Beiträge zur Treibhausgasemission, aber auch unterschiedliche Abhängigkeiten von Importen, die insgesamt den Löwenanteil der europäischen Energieversorgung ausmachen, ergeben. Die Vorstellung einer europäisch harmonisierten Energiestrategie dürfte auch aus Gründen der Daten aus Abbildung 1.4 nicht einfach zu realisieren sein, was die Relevanz von Sicherheitsdiskussionen in Deutschland, das von Ländern umgeben ist, die Kernspaltungsenergie intensiv nutzen, relativiert.

## 1.4 Die Situation in Deutschland

Verfeinern wir den Blick weiter für den Energiemix, der in der deutschen Stromversorgung eingesetzt wird. Die zugänglichen Zahlen der bereitgestellten Energie beziehen sich auf das Jahr 2007, neuere Werte dürften höhere Anteile der regenerativen Quellen ausweisen. In 2007 wurden 644 TWh elektrischen Stroms in Deutschland abgenommen. Aus Abbildung 1.5 erkennen wir, dass Strom aus drei etwa gleich großen Hauptquellen Braun-

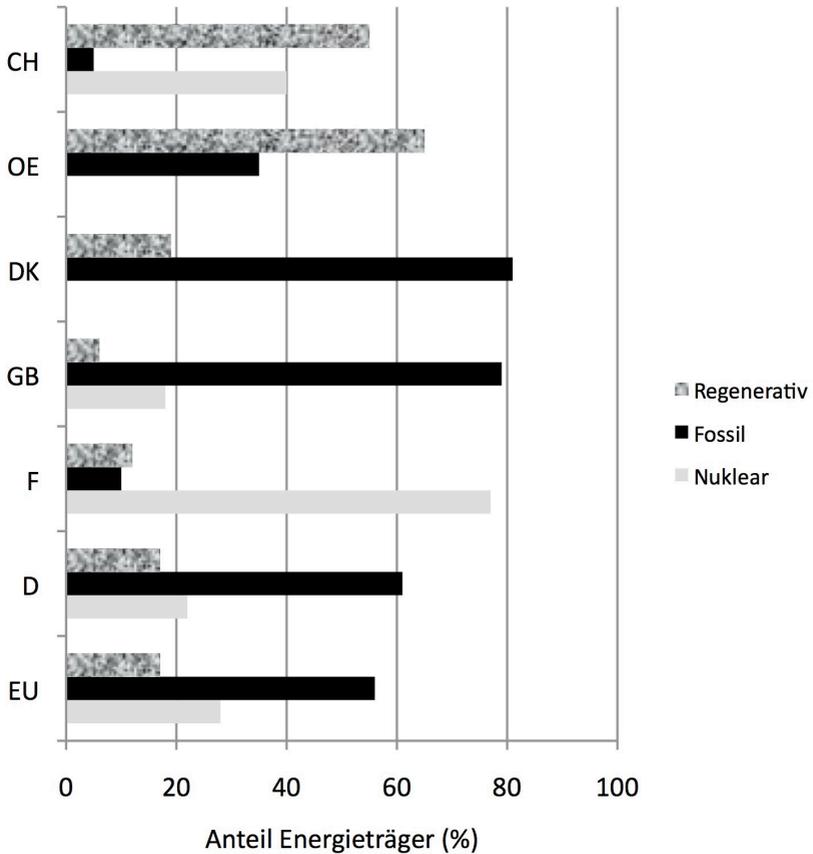


Abbildung 1.4: Nutzung unterschiedlicher primärer Energieträger für die Stromerzeugung in Europa. Die Daten sind für das Jahr 2008 (Quelle BDEW 2010)

kohle, Steinkohle und Kernspaltung bereitgestellt wird. Den nächstgrößten Block stellen regenerative Quellen bereit. In der Darstellung sind Wind und Wasserkraft von anderen Quellen getrennt angegeben. Danach folgt Erdgas als Träger. Erdöl spielt in Deutschland nur eine sehr untergeordnete Rolle zur Stromerzeugung. Der allergrößte Anteil der Mineralölimporte geht in die Mobilität und in Heizungsanwendungen. Die Kernspaltungskraftwerke sind in Abbildung 1.5 in „alte Anlagen“ und „neue Anlagen“ entsprechend der Unterscheidung des Kernenergiemoratoriums unterteilt. Man erkennt, dass beide Anteile sehr unterschiedlich zur Stromerzeugung beitragen.

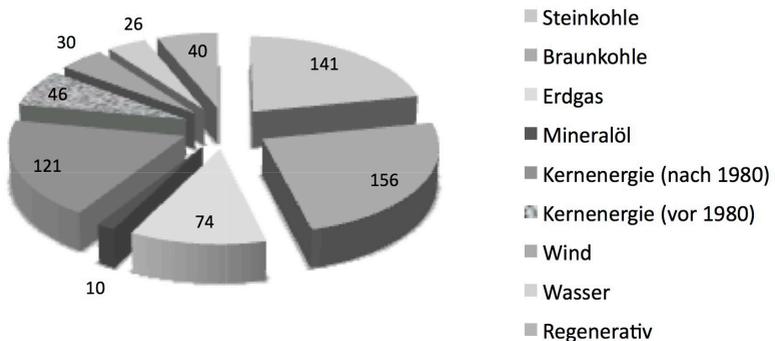


Abbildung 1.5: Anteile der Primärenergieträger für die Stromerzeugung in Deutschland. Die Zahlen sind in TWh angegeben. Die Werte gelten für 2009 (Quelle: BMWI)

Für die Diskussion eines Atomausstiegs ist relevant, dass die Daten aus Abbildung 1.5 nicht wiedergeben, wie groß die Reservekapazitäten des Kraftwerkparks sind. Grundsätzlich gibt es für alle fossilen Primärenergieträger Kraftwerksreserven, die im Falle des sofortigen Ausstiegs mobilisiert werden können. Dies dürfte allerdings eine Anlaufzeit von Monaten bis Jahren erfordern, je nachdem, ob es sich um Reserven turnusmäßig oder

längerfristig abgeschalteter Anlagen oder um neue Kapazitäten, die im Bau sind, handelt. Diese Reserve ist, obgleich Listen des Kraftwerkparks im Internet (Wikipedia) zugänglich sind, schwer zu quantifizieren, da nur die Betreiber über Zustand und Verfügbarkeit sichere Aussagen machen können. Für die hiesige Diskussion ist es jedenfalls plausibel anzunehmen, dass sich eine Reserve von bis zu 20 % der Stromnachfrage aus Abbildung 1.5 darstellen lassen könnte.

Einen Anhaltspunkt dafür liefern die veröffentlichten Daten (Quelle BDEW) über die Auslastung des Kraftwerkparks am 3.12.2007, dem Tag mit der höchsten Leistungsanforderung für das deutsche Stromnetz. Diese Daten sind in Abbildung 1.6 als Kreisdiagramm dargestellt, wobei der Gesamtumfang des Kreises einer installierten Gesamtleistung von 129,26 GW entspricht.

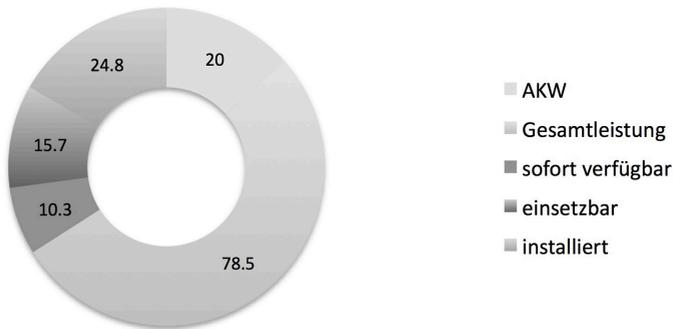


Abbildung 1.6: Gesamtleistung und Reserven des deutschen Kraftwerksparks am 3.12.2007 (Quelle: BDEW) Die Daten in GW beziehen sich auf alle „öffentlichen“ und privaten Großkraftwerke mit einer Nennleistung von über 1 MW.

Der Gesamtleistungsanforderung von 78,5 GW, die zu etwa 20 GW von Kernspaltungskraftwerken geliefert wurde, stehen etwa 50 GW an Reserven unterschiedlicher Einsatzbereitschaft gegenüber. Man erkennt, dass allein vor dem Hintergrund dieser Betrachtung die deutschen AKWs kurz- bis mittelfristig ersetzbar wären. Genaue Angaben sind allerdings auf Basis dieser Zahlen nicht sicher machbar, da der Zubau von regenerativen Kraftwerken und der Abgang von veralteten Anlagen die Bilanz heute mög-

licherweise etwas anders aussehen lassen. Hinzu kommen aktuelle Neubauten und Planungen von Kraftwerken, die hier nicht im Einzelnen betrachtet werden sollen. Eine detaillierte Erörterung dieser Zusammenhänge findet man bei der Deutschen Energie Agentur (dena), welche die wesentlichen Fakten im Internet zur Verfügung stellt.

Betrachtet man die dort vorgestellten Ergebnisse, so kann man folgern, dass die oben erwähnten Annahmen über einen möglichen Atomausstieg nur belastbar sind, wenn man die Erneuerung und Erweiterung des Kraftwerksparks mit Nachdruck vorantreibt. Dies verdeutlicht Abbildung 1.7, welche die erforderliche Entwicklung des Kraftwerksparks im Planungszeitraum von etwa 10 Jahren angibt. Im Zielwert ist eine Sicherheit für die Erhaltung der Versorgungssicherheit eingerechnet. Man beachte, dass die Zahlen die gesichert verfügbare Leistung und nicht die installierte Leistung betreffen. Die installierte Leistung muss entsprechend den Angaben von Tabelle 1.2 erheblich höher liegen. Dies gilt insbesondere für die regenerativen Quellen, deren Hauptzuwachs in der Form von Offshore-Windanlagen und Photovoltaik-Installationen geplant ist. Derartige Projektionen enthalten vielfache Annahmen, beispielsweise über einen Minderverbrauch an Strom, die sich nicht sicher belegen lassen. Daher sind Daten wie in Abbildung 1.7 als Richtwerte und nicht als absolute Planungsvorgaben anzusehen. Es ist allerdings klar, dass wir uns keine erheblichen gesellschaftlichen Reibungsverluste bei der Umsetzung dieser Planung in der Größenordnung, wie sie Abbildung 1.7 angibt, leisten können. Über die Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung in dieser Projektion sowie über die Ausfüllung der noch fehlenden Kapazitäten gehen die Meinungen auseinander.

Eine Hürde für den Einsatz der Reserve und für den diskutierten Ausbau der Kapazitäten für regenerative Stromerzeugung sind die Strukturen und Kapazitäten der Stromnetze. Diese bedürfen national, aber auch im Verbund mit Europa, eines Ausbaus. Es existieren detaillierte Planungen für einen derartigen Ausbau, die Umsetzung wird auch durch Faktoren, die außerhalb der gegenwärtigen Betrachtung liegen, erschwert. Problematisch bei derartigen pauschalen Betrachtungen ist weiterhin, dass der Stromverbrauch erheblichen Schwankungen mit kurzen und langen Perioden unterliegt. Diese Schwankungen werden durch geeignete Betriebsführung, durch punktuelles Zuschalten von Spitzenlastkrafteerzeugung aus Erdgas und Biomasse und durch internationalen Stromaustausch gedeckt. Für Kapazitätsbetrachtungen ist wichtig, dass wir in Deutschland eine Versorgungssicherheit voraussetzen und daher Auslegungen ausreichend oberhalb der maximal benötigten Leistung ansetzen müssen. Eine vorausschauende Planung, die zudem nötige Wartungsarbeiten mit einbezieht, kommt

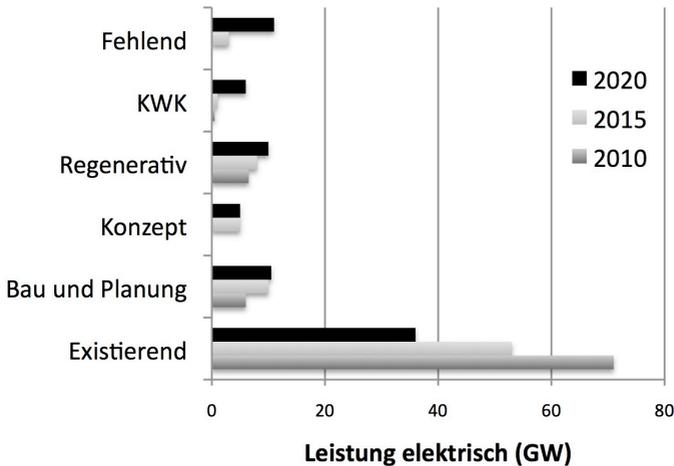


Abbildung 1.7: Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks bei Atomausstieg und eines reduzierten Verbrauchs entsprechend dem Energiekonzept. (KWK ist Kraft-Wärme-Kopplung, Quelle: dena 2008)

daher zu dem Schluss, dass wir kurzfristig erhebliche Anstrengungen zum Bau von Leitungen und Steuereinrichtungen, sowie für elektrotechnische Spezialgeräte zum stabilen Betrieb des Netzes unternehmen müssen. Vordringlich ist dabei nach Planungen der dena (Studie aus dem Jahr 2008) der Aufbau von Netzelementen zur Ergänzung des bestehenden Netzes. Dies wäre in jedem Fall erforderlich, um die graduelle Restrukturierung der Energieversorgung im Zuge der Einbindung der regenerativen Quellen mit einem verteilten System von Quellen und Nutzern von Strom in Deutschland zu begleiten.

### 1.5 Folgen einer Entscheidung für den Ausstieg

In diesem Abschnitt soll angedeutet werden, welche technischen Folgen sich aus einer hypothetischen Entscheidung für einen absoluten Atomausstieg mit festgelegtem Enddatum 2020 und ohne weitere Revidierung der Entscheidung ergeben würden. Dies soll nicht unterstellen, dass der Verfas-

ser diese Lösung als die aus Expertensicht günstigste Variante bevorzugt. Es sei noch einmal betont, dass diese Entscheidung eine Energiewende aus freien Stücken darstellt, bei der wir lernen können, welche Folgen sich aus einem dirigistischen Eingriff in das Geflecht von Markt und Technologie im Energiebereich ergeben. Wir werden auch den weniger luxuriösen Fall, in dem externe Faktoren uns zu weiteren solchen Einschnitten zwingen, in Zukunft erleben; dabei können wir auf die Lehren aus der gegenwärtigen Situation zurückgreifen. Im Lichte der gravierenden Ereignisse, die vor uns liegen, ist die Atomdiskussion also eine Art Vorübung, da wir noch vollständig durch existierende und preisgünstige fossile Alternativen gesichert sind. Dies mag in der Zukunft nicht mehr der Fall sein. Weiter sei daran erinnert, dass bezogen auf die globale Situation die Entscheidung in Deutschland quantitativ von untergeordneter Bedeutung ist (was nicht heißt, dass man die Folgen ignorieren könnte). Wesentlich bedeutsamer ist die deutsche Strategie als Vorbild für andere und als Grundlage für künftige Exportchancen. Am wenigsten sinnvoll wäre ein „weiter wie bisher“, ohne die geschaffene Bereitschaft zu Veränderungen sinnvoll zu nutzen.

Bedauerlicherweise sind wir auf diese Chance nicht gut vorbereitet, weil wir über keinen nationalen Plan für die Fortentwicklung der Energieversorgung verfügen. Alles was wir haben ist eine Sammlung von Langfristzielen, die uns als Orientierung dienen und im Energiekonzept aus dem Jahr 2010 zusammengefasst sind. Dieses Konzept stellt einen Handlungsrahmen dar und wurde in seinen wissenschaftlichen und technischen Grundannahmen durch die Ereignisse in Japan nicht berührt. Deutlich verändert haben sich die nicht-technischen Rahmenbedingungen der Diskussion, die hier allerdings nicht weiter betrachtet werden. Eine sinnvolle Konsequenz aus dieser Situation wäre die Etablierung eines langfristigen und nachhaltigen Mechanismus zur Erstellung und Fortschreibung eines nationalen Energieplans unter Einbeziehung aller relevanten Beteiligten.

Zunächst kann man feststellen, dass ein Verzicht auf Kernspaltungsenergie in Deutschland rein quantitativ darstellbar ist, wenn wir die existierenden und geplanten konventionellen Kraftwerke betrachten. Der Verlust von etwa 20 GW an Kapazität kann verkraftet werden, ohne auf Importe zurückzugreifen, vor allem wenn der Netzausbau und ein begrenztes Lastmanagement durch Zentralsteuerung bis 2020 realisiert sind. Auch ein sofortiger Ausfall der „Moratoriumsmeiler“ ist rein von der Kapazität her darstellbar. Diese Aussage setzt allerdings voraus, dass der in Abbildung 1.7 angegebene Prozess der Erneuerung des Kraftwerksparks störungsfrei abgewickelt wird.

Was für Folgen ergeben sich daraus? Die Hypothese, dies durch Energiesparen zu kompensieren, ist ohne sehr konkrete Vorschläge dazu nicht stichhaltig. Dies muss besonders unter der Maßgabe gesehen werden, dass man an den Plänen des Energiekonzepts von 2010 festhalten will, die ohnehin enorme Einsparlasten in Bezug auf alle Verwendungsformen fossiler Energie vorsehen.

Der Vorschlag, die Kapazität der Stromlieferung durch verstärkten Einsatz regenerativer Energien zu ersetzen, hat ebenfalls seine Tücken. Solche Erhöhungen müssten über die Planungen, die in Abbildung 1.7 dargestellt sind, hinausgehen. Unterstellen wir, dass die Kapazität an Wasserkraft nicht wesentlich erhöht werden kann, dann müsste die Erzeugung vor allem aus Windkraft sowie aus Solarkraft und Biomasse getragen werden. Wenn wir die Größenverhältnisse aus Abbildung 1.5 betrachten und dabei bedenken, dass die installierte Leistung erheblich über der benötigten Dauerleistung liegen muss (siehe Tabelle 1.2), dann wird klar, dass diese Umstellung einen erheblichen Kraftakt darstellt, der zudem zusätzlich zu den CO<sub>2</sub>-Minderungen, die im Energiekonzept vorgesehen sind, zu leisten wäre. Allerdings sollten wir bedenken, dass all diese Installationen in längeren Zeiträumen, die über ein Jahrzehnt hinausgehen, notwendig werden, da ja auch das Energiekonzept im Jahre 2050 keine Atomkraft mehr vorsieht. Die Geschwindigkeit des nötigen Zubaus scheint allerdings nur schwer darstellbar zu sein, wenn man dies innerhalb eines Jahrzehnts fordert. In jedem Fall ist die Erhöhung der heimischen Installationen für die Bereitstellung von Primärelektrizität sinnvoll und nützlich, da sie tendenziell unseren Konsum an fossilen Energieträgern reduzieren hilft. Die Konzepte zur regionalen Lieferung von elektrischer Energie aus Solarkraftwerken etwa durch das DESERTEC-Projekt sind hier nicht mit eingerechnet, da die Chancen auf Realisierung nicht klar sind. Eine derartige Entwicklung wird nur dann als günstig für die nationale Energieentwicklung eingeschätzt, wenn die komplexen Rahmenbedingungen eines derartigen Projekts stabil und verlässlich geregelt werden können.

Ein gravierendes Problem des massiven Einsatzes regenerativer Energien ist die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit. Wenn erhebliche Mengen des Stroms dann nicht zur Verfügung stehen, wenn sie gebraucht werden, muss man entweder fossile „Schattenkraftwerke“ vorhalten oder durch Stromimporte die Defizite decken. Die vielfach ins Feld geführten „intelligenten Netze“ können hier nur bedingt durch Lastverteilung und Lastverschiebungen helfen. Den Stabilisierungsbeitrag von Biogasanlagen sollte man dann nicht überschätzen, wenn der Gesamtbeitrag der nicht jederzeit abrufbaren Erzeugungskapazitäten den Betrag der Kernkraftkapa-

zitäten erreicht. Wir benötigen daher zusätzlich zu den aufgeführten Maßnahmen eine Reihe von Speicherstrategien, die Strom in unterschiedlichen Mengen für unterschiedliche Zeiten speichern, um Verbrauchsschwankungen im Zeitbereich von Stunden bis Monaten ausgleichen zu können. Eine derartige Palette von Speichern steht uns heute nicht zur Verfügung, zumindest nicht als einsetzbare Technologien. Hieraus ergibt sich ein enormer Bedarf an Forschung und Entwicklung, der unten weiter thematisiert wird.

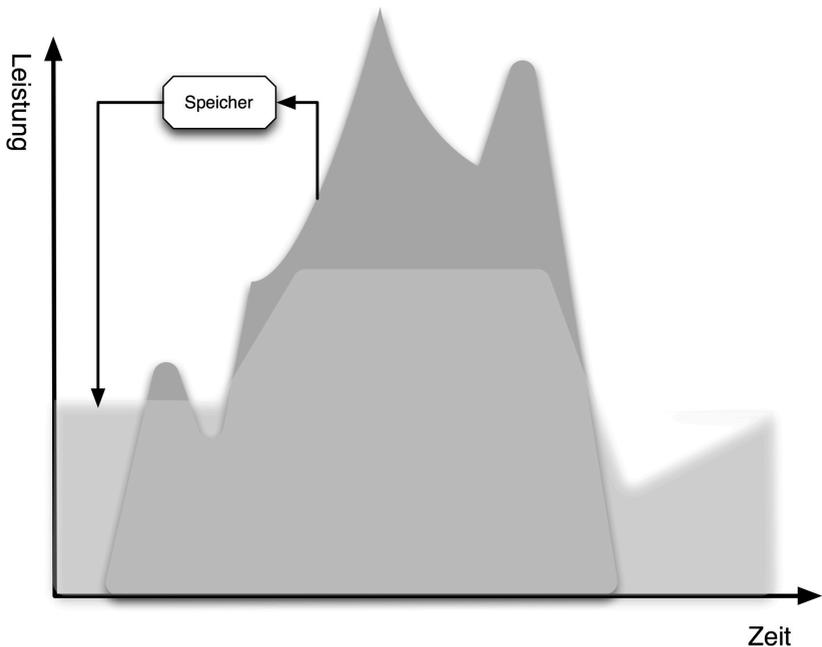


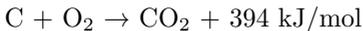
Abbildung 1.8: Zum Speicherproblem beim Einsatz von erheblichen Mengen von Energie, die uns nicht kontinuierlich zur Verfügung steht. Die helle Fläche zeigt den Verbrauch, die dunkle Fläche eine mögliche Verfügbarkeit von elektrischer Leistung. Der Speicher gibt seinen Inhalt zu allen Zeiten der Leistungsunterdeckung ab.

Die Problematik ist, bezogen auf ein einzelnes Kraftwerk, in Abbildung 1.8 dargestellt. Hier wird nur auf den kurz- und mittelfristigen Zeitbereich von etwa einem Tag abgehoben. Der Speicher muss erhebliche Ener-

giemengen in kurzer Zeit sowohl aufnehmen als auch abgeben können. Für saisonale Schwankungen sind die Reaktionszeiten weniger kritisch, dafür sind allerdings die erforderlichen Speicherkapazitäten umso größer. Es ist offensichtlich, dass eine Verkettung von unregelmäßig Leistung abgebenden Anlagen die Schwankungen teilweise ausgleichen und dass ein Angleichen der Lastkurve an die verfügbare Leistung sehr wünschenswert ist. Beiden Maßnahmen sind allerdings quantitative Grenzen gesetzt, die umso mehr spürbar werden, als sich der Beitrag stabiler Erzeuger im Kraftwerkspark reduziert.

So wird wohl die plausible Folge sein, dass kurzfristig zumindest die abgebaute Kapazität aus Kernspaltungsanlagen durch bestehende oder neu zu bauende fossile Kraftwerke ersetzt werden wird. Dies ist quantitativ auf jeden Fall eine mögliche technische Lösung. Zur Abschätzung der Menge der daraus folgenden zusätzlichen Abgabe von CO<sub>2</sub> gehen wir von einem Beitrag der Stromerzeugung zur nationalen CO<sub>2</sub>-Emission von etwa 400 Mio t pro Jahr aus. Mit den Angaben aus Abbildung 1.5 ergäbe eine Abschätzung einen oberen Wert von 120 Mio t CO<sub>2</sub> pro Jahr zusätzlich bei Abschaltung aller deutschen Kernkraftwerke. Dieser Wert entspricht mit den Daten aus Abbildung 1.3 etwa 2 % der Emissionen der USA oder 0,005 % der globalen Emissionen.

Reduktionen dieses oberen Wertes können wie folgt erreicht werden. Man kann den fossilen Brennstoff so weit wie möglich als Erdgas wählen. Die chemische Struktur von Erdgas mit seinem Gehalt an Wasserstoff gegenüber Kohle hat zur Folge, dass die gleiche Energiemenge mit etwa 50 % geringeren Emissionen an CO<sub>2</sub> erzeugt werden kann. Das Bruttoenergieverhältnis ergibt sich aus folgenden Gleichungen, die absolute Menge, wenn man die Umwandlungsverluste (Tabelle 1.3) mit berücksichtigt.



Die erreichbare Minderung hängt davon ab, wie viele zusätzliche Kraftwerke mit Erdgas betrieben werden. Würde nur Erdgas zur Deckung des durch die Atomkraftabschaltung sich bildenden Defizits der Stromerzeugung eingesetzt, so betrügen die Emissionen etwa 60 Mio t/Jahr. Aus Gründen der Diversifizierung des Brennstoffpools sollte allerdings nur ein Teil der benötigten Primärenergieträger Erdgas sein.

Weitere Minderungen ergeben sich aus den Beiträgen der regenerativen Energien und aus Sporbemühungen, die aber sehr schwer planbar sind. Innerhalb der kommenden 10 Jahre werden heute noch neuartige Technologien der Energiewandlung und Energiespeicherung nur einen geringen

Beitrag leisten können. Diese Anstrengungen wirken erst in längeren Zeiträumen. Sie werden allerdings dringend benötigt, um die Einsparziele des nationalen Energiekonzepts mit einer Gesamtemission von CO<sub>2</sub> von etwa 200 Mio t/Jahr zu erreichen. Dieses Ziel ist durch einen hypothetischen beschleunigten Atomausstieg nicht gefährdet, wohl aber die in den Graphiken vorgestellte lineare Absenkung der Emission.

## 1.6 Die längerfristige Zukunft und die Rolle der Forschung

Die bisherigen Ausführungen sollten zeigen, dass der Atomausstieg in kurzer Zeit aus technischer Sicht machbar ist, wenn bestimmte Randbedingungen eingehalten werden und wenn man darauf verzichtet zu fordern, dass dies emissionsneutral im Planungszeitraum sein soll. Es wurde weiter dargelegt, dass der Atomausstieg nur ein kleiner Teil einer Kette von Energiewenden ist, die sich aus den fundamentalen Veränderungen der Verfügbarkeiten von fossilen Rohstoffen sowie möglicher weiterer nicht-technischer Rahmenbedingungen der globalen Entwicklung ergeben.

Somit folgt als Fernziel der Aufbau einer Energieversorgung, die auf fossile Energieträger verzichtet. Dieses Ziel dürfte bei uns einen Realisierungszeitraum von einem Jahrhundert haben. Da allerdings der Zuwachs an Energieverbrauch besonders dort am größten ist, wo es noch keine Infrastruktur, die auf fossilen Energieträgern beruht, gibt, sollten die alternativen Technologien am besten so schnell wie möglich eingesetzt werden, um den weiteren Anstieg der Nutzung fossiler Energieträger zumindest abzubremsen. Derartige Projektionen bedürfen aus heutiger Sicht zunächst einer sehr intensiven Forschungsanstrengung, da wir nicht über alle Technologien verfügen, die eine systemisch geschlossene Versorgung mit regenerativen Energien in Dimensionen von Volkswirtschaften ermöglichen. Wir benötigen für einen stufenweisen Prozess eine Reihe von Optionen, die technologisch machbar sind, um der Gesellschaft die Möglichkeit zu geben, in einem sich verändernden Umfeld eine jeweils bestmögliche Strategie zur Energieversorgung auszuwählen und diese auch gegen unerwartete Entwicklungen (siehe Katastrophe in Japan) durch Alternativen abzusichern. In Abbildung 1.9 ist eine konservative Struktur einer „hybriden“ Energieversorgung dargestellt, wie sie sich aus der Umsetzung etwa des deutschen Energiekonzepts ergeben würde.

In den Bedarfsfeldern (grau) der Abbildung 1.9 sind beispielhaft Technologiefelder genannt, die innerhalb der kurzfristigen Spanne von 10 Jahren erhebliche Beiträge zur Realisation einer hybriden Energieversorgung leisten.

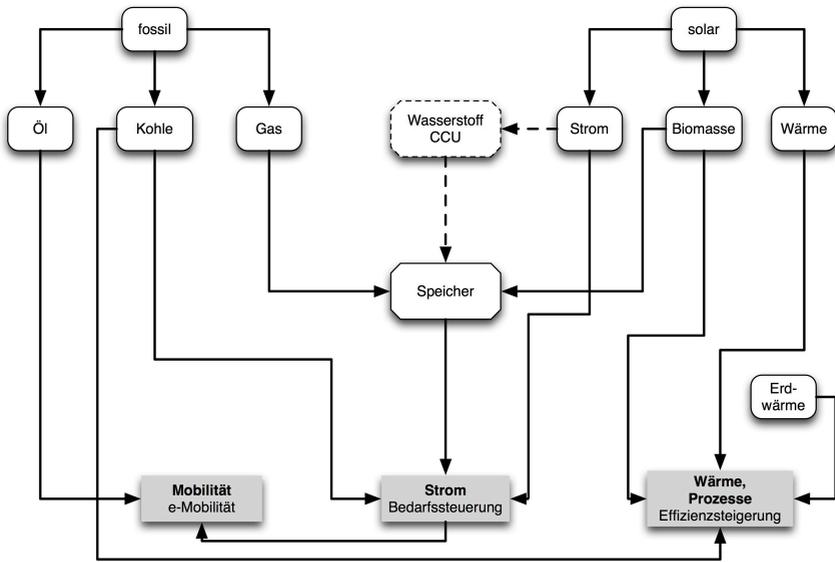
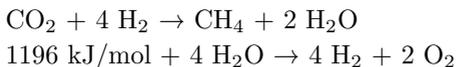


Abbildung 1.9: Eine nicht-nukleare Energieversorgung in naher Zukunft. Der Anteil der solaren Energieträger gegenüber den fossilen Trägern wird als sich stetig vergrößernd angenommen. Dazu muss graduell der gestrichelte Speicherbereich verfügbar werden.

Die Realisation eines derartigen Szenarios erfordert vielfältige Anstrengungen in Forschung und Entwicklung. Alle Disziplinen der Natur- und Ingenieurwissenschaften werden dazu ihre Beiträge zu leisten haben. Es würde den Rahmen dieser Darstellung sprengen, auch nur die wesentlichen Forschungsfelder zu benennen. Eine im Internet verfügbare Studie der Akademien Leopoldina und acatech hat dies in umfassender Weise getan. Der folgende Text beschreibt etwas ausführlicher die Rolle der Chemie in der Sicherstellung der breiten Anwendungen regenerativer Energien. Diese Rolle wird notwendig, da wir die bisher als selbstverständlich vorausgesetzten Eigenschaften der stofflichen Natur der fossilen Energieträger für die regenerativen Energieformen zumindest teilweise synthetisch nachbilden müssen. Nur dann können wir sie speichern, transportieren und handeln, ohne dabei Einschränkungen in Zeiten, Orten und Mengen hinnehmen zu müssen.

Die Speicherung von Energie wird in Abbildung 1.9 nur als chemischer Massenspeicher angegeben. Thermo-mechanische Speicher, deren Technologie wir so weit beherrschen, dass wir zwar weitere Forschung zur Effizienzsteigerung benötigen, sie aber bereits einsetzen oder innerhalb des 10-jährigen Planungszeitraumes verfügbar haben, sind nicht aufgeführt, obgleich sie sehr bedeutsam für den voll-funktionalen Ersatz fossiler oder nuklearer Kapazitäten zur Energiewandlung sind.

Als chemischer Massenspeicher kommt „synthetisches“ Erdgas in Frage. Dieses kann unter Verwendung existierender Infrastruktur zur Verteilung, zur Speicherung und zur Verstromung gleichzeitig aus unterschiedlichen Quellen bezogen werden. Neben fossilen Quellen steht uns Erdgas aus Biomasse zur Verfügung und es kann auf mittlere Sicht durch Hydrierung von  $\text{CO}_2$  mit Wasserstoff aus der Spaltung von Wasser hergestellt werden.



Zur Unterstützung einer Energieversorgung, wie sie in Abbildung 1.9 skizziert ist, wird eine erhebliche Weiterentwicklung bekannter Technologien benötigt. Diese können zunächst durch die Bereitstellung verbesserter Materialien und Prozesse einen großen Beitrag zur Einsparung von Energieträgern leisten. Weiterhin benötigen wir diese Entwicklungen zur effizienten Gewinnung regenerativer Primärenergie durch beispielsweise Windkraft und Photovoltaik. Solche Anstrengungen sind erforderlich, um die Vorgaben des Energiekonzepts zu realisieren. Sie können auf einer Zeitskala von einem Jahrzehnt wirksam werden.

Forschung dagegen hat einen sehr langen zeitlichen Vorlauf, bis sie im Bereich von Energietechnologien auf der Weltkala wirksam wird. Im Planungszeitraum von 10 Jahren hat grundlagenmotivierte Forschung keine Wirkung auf die Energieversorgung. Allerdings muss immer bedacht werden, dass unsere heutigen technologischen Möglichkeiten auf Resultaten der grundlagenmotivierten Forschung basieren, die vor Generationen erzielt und auch finanziert wurden.

Der künftige Einsatz heute neuartiger Technologien birgt enorme wirtschaftliche Chancen in sich. Somit ist eine rechtzeitige Erforschung der grundlegenden Mechanismen verzahnt mit technologischer Entwicklung und regionaler Erprobung in Deutschland eine zentrale Aufgabe der Zukunftsvorsorge. Aus den wissenschaftlichen Erfahrungen der Vergangenheit folgt, dass wir Technologien nicht nur empirisch entwickeln, sondern gleichzeitig auch anstreben sollten, ein vertieftes Verständnis der relevanten Naturvorgänge zu erlangen, aber ebenso auch der gesellschaftlichen

Prozesse bei der Umsetzung technologischer Möglichkeiten. Das Beispiel der Fusionsforschung zeigt uns, dass ohne Fortschritte der Grundlagenforschung eine Realisierung als Fusionskraftwerk nicht möglich ist. In anderen Technologien zur Wandlung von Energie wie der Wasserspaltung oder der Batterietechnik ist das weniger offensichtlich, jedoch gleichermaßen bedeutsam. Es wäre eine sehr nützliche Folge der gegenwärtigen Diskussionsphase, wenn sich daraus eine breit gefächerte und nachhaltig unterstützte Initiative zur Erforschung von Grundlagen und Anwendungen von neuartigen Energiewandlungsprozessen entwickeln würde. Aus Sicht der Chemie als der zentralen Wissenschaft, die Energieumwandlungen durch stoffliche Umwandlung von Energieträgern bewirkt, ergeben sich einige systemische Aussagen, welche helfen können, einige Bereiche dieser Forschung zu benennen.

Auf sehr lange Sicht gibt es zunächst die Option der Kernfusion. Diese Option kann wegen extrem komplexer wissenschaftlicher Fragen heute nicht belastbar beurteilt werden. Es scheint daher unerlässlich, die entsprechenden internationalen Projekte wie ITER oder DEMO mit Nachdruck weiterzuverfolgen. Stünde uns mit der Kernfusion eine hochintensive Quelle von Wärmeenergie auf hohem Temperaturniveau (oberhalb 1000 Grad Kelvin) zur Verfügung, so könnte man damit nicht nur direkt und kontinuierlich Strom erzeugen, sondern auch durch chemische Prozesse Wasserstoff gewinnen und diesen zusammen mit solarem Wasserstoff in eine regenerative Energieinfrastruktur integrieren. Fusionsenergie ist somit keine Konkurrenz oder Alternative zu regenerativer Energie, sondern eine komplementäre Ergänzung für Hochtemperaturprozesse. Dies wird in Abbildung 1.10 dargestellt, wo in Fortschreibung der Abbildung 1.9 der Anteil der fossilen Quellen durch Fusion ersetzt wurde.

Dadurch würde sich die Herstellung neuer Brennstoffe aus Wasserstoff und einer Kohlenstoffquelle wie  $\text{CO}_2$  wesentlich vereinfachen lassen, da für die nötigen katalytischen Schritte ein günstig hohes Temperaturniveau verwendet werden kann. Das hohe Temperaturniveau würde weiter die Gasphasenelektrolyse von Wasser mit keramischen Elektroden möglich machen, was mit rein solaren Energiequellen zumindest deutlich weniger attraktiv ist. Schließlich könnten auch die Herstellung von Eisen und Zement sowie anderer energieintensiver Grundstoffe von der Existenz einer günstigen Quelle von Prozesswärme auf hohem Temperaturniveau profitieren.

Auf vergleichbaren Zeitskalen wie die Fusionsforschung bewegt sich die Forschung zur biomimetischen Gewinnung solarer Energie. Dabei handelt es sich entweder um photochemische oder um photo-elektrochemische Pro-

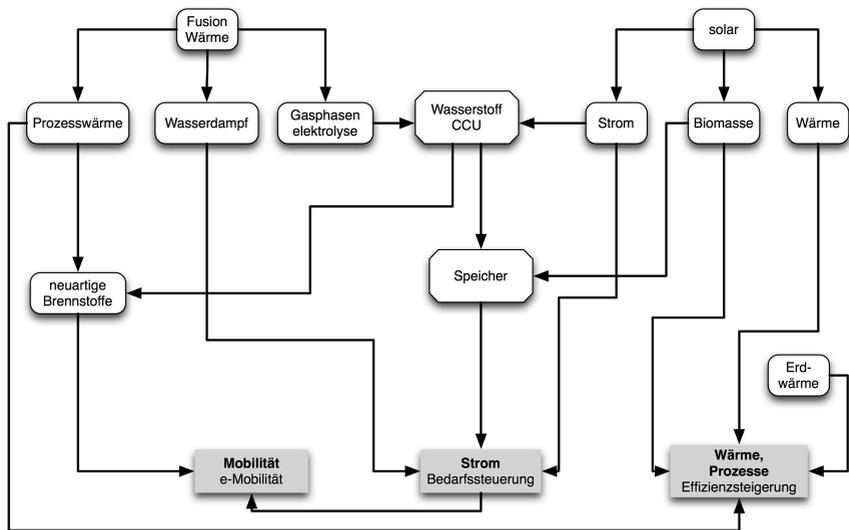


Abbildung 1.10: Eine Vernetzung von solarer und Fusionsenergie zur Versorgung der Bedarfsquellen Strom, Mobilität und Prozesswärme. Chemische Energiespeicherung und Wasserstoffgewinnung durch die Spaltung von Wasser sind in diesem Konzept im Weltmassstab realisiert.

zesse mit molekularen oder nanostrukturierten Funktionsmaterialien. Sie zielen ebenfalls auf die Wasserspaltung und auf die Kombination der Wasserspaltung mit einer gleichzeitigen Umsetzung von  $\text{CO}_2$  zu solaren Energieträgern. Auch biologische Verfahren zur Umwandlung von Sonnenenergie mit besonderen „Energieernteeorganismen“, die entweder Wasserstoff (Algen) oder stoffliche Energieträger (Biomasse) liefern, werden erhebliche Zeiten bis zu ihrer möglichen groß-skaligen Realisation benötigen. Randbedingungen für ihre Umsetzung sind immer die Nachhaltigkeit in Materialien und Prozessen und ihre Skalierbarkeit. Verfahren, die Materialien (z.B. Edelmetalle) einsetzen, die nicht in der erforderlichen Menge verfügbar sind, machen ebenso wenig Sinn, wie Verfahren, die um Ressourcen (Land, Wasser, Nährstoffe) konkurrieren, die wir für unsere Ernährung oder die Erhaltung unserer natürlichen Ökosysteme benötigen. Skalierbarkeit beinhaltet neben Wirtschaftlichkeit in ökonomischen Zusammenhängen auch eine Systemanalyse im Hinblick auf die Freisetzung von Reststof-

fen: Verfahren, die in ihrem Stoffkreislauf (z.B. energiereiche Reaktanden, Opferstoffe oder wenig stabile Materialien) vergleichbar oder mehr Treibhausgase oder „Abfälle“ emittieren, als man mit ihnen sparen kann, sind ebenfalls nicht hilfreich, selbst wenn sie sehr elegante Lösungen für das Problem der Umwandlung solarer Energie bieten.

Kehren wir noch einmal zu Abbildung 1.9 zurück und untersuchen das Zusammenwirken von Primärenergie und Speicherverfahren. In Abbildung 1.11 ist dies näher aufgeschlüsselt.

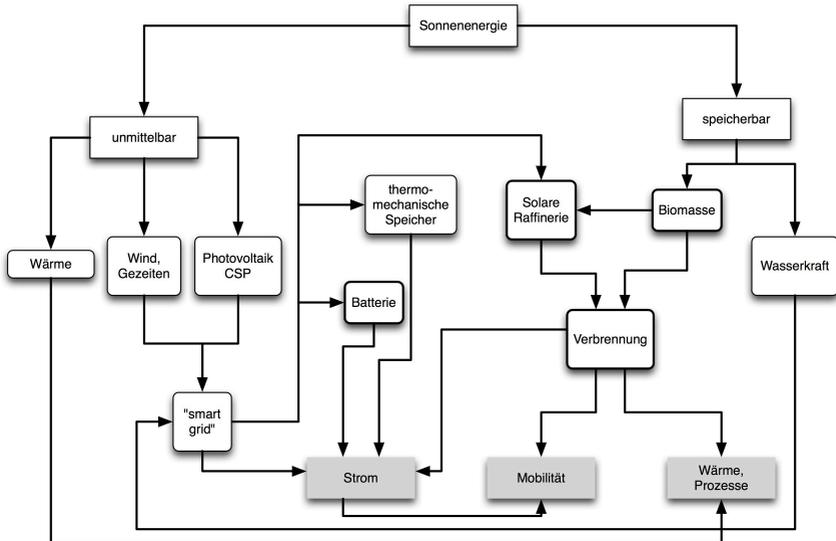


Abbildung 1.11: Das Zusammenwirken von regenerativer Energie und Speichertechniken ermöglicht eine nachhaltige Versorgung mit allen Energieträgern.

Wir unterscheiden Umwandlungen von Sonnenenergie in unmittelbar nutzbare Energie und in ohne unser Zutun speicherbare Energie. Letztere ist wesentlich seltener als erstere, die wir in für alle Bedürfnisse der Menschheit ausreichender Menge bereitstellen können. Wie oben ausgeführt wurde, liegt das zentrale Problem darin, dass diese Energieformen nicht mit den Bedarfsträgern in stofflicher und raum-zeitlicher Hinsicht zusammenpassen. Also benötigen wir eine Kette von Prozessen, die entsprechend den Anforderungen die Primärenergie in geeignete Träger umwandelt. Diese Kette ist in Abbildung 1.11 dargestellt. Zunächst sollte

so viel wie möglich primäre Elektrizität direkt verbraucht werden. Dafür benötigen wir flexible Verteilstrukturen, die in der Lage sind, einen fluktuierenden Bedarf einem ebenfalls, aber mit einer anderen Zeitkonstante, fluktuierenden Angebot anzupassen. Dies geschieht durch einen Regionalausgleich (Windkraft gegen Solarkraft und Transport von Erzeugerregionen in Verbraucherregionen) und durch eine in Grenzen machbare Steuerung des Verbrauchs. Dabei treten mannigfache elektrotechnische und informationstechnische Herausforderungen auf, die für sich einen erheblichen Forschungsbedarf erzeugen. Der Aufbau der nötigen Infrastruktur ist ein langfristiges Werk, an dessen Ende das „smart grid“ aus Abbildung 1.11 steht.

Nicht alle Lücken zwischen Bedarf und Angebot können allerdings so geschlossen werden (beispielsweise Sommer-Winterfluktuationen), und außerdem benötigen wir stoffliche Energieträger für Mobilität und für Produktionszwecke. Steht uns dafür kein fossiler Energieträger mehr zur Verfügung, so müssen wir diese stoffliche Energiespeicherung anderweitig realisieren. Für begrenzte Anwendungen werden wir Batterien (mobil und stationär) sowie thermomechanische Speicher (Pumpkraftwerke, Druckluftspeicher, Wärmespeicher) einsetzen. Batterien sind chemische Energiespeicher, in denen Elektrodenmaterialien durch Stoffumwandlungen elektrische Energie speichern und diesen Prozess durch einen weiteren Stoffaustausch über den Elektrolyten unter Steuerung des elektrischen Potentials wiederholbar machen.

Ein signifikanter Anteil der Primärenergie wird allerdings zur Stabilisierung des Systems (Bevorratung, Handel und Transport von Energie) und für die angedeuteten Bedarfe an stofflichen Energieträgern (Lastverkehr, Flugzeuge, Luxusmobilität, Stoffherzeugung) in molekularer Form gespeichert und als „solar fuel“ verteilt und genutzt werden. Dazu wird Elektrizität in Wasserstoff umgewandelt, oder der Wasserstoff durch photochemische Wandler erzeugt. Diese chemischen Prozesse sind heute nicht leistungsfähig und auch nicht nachhaltig oder skalierbar. Ihre zwingend nötige Verbesserung verlangt daher erhebliche Anstrengung in der grundlagenorientierten Forschung, begleitet von entsprechenden umfangreichen technologischen Entwicklungen. Die Forschung wird sich dabei sowohl mit neuen Materialien als auch mit der Funktionsaufklärung der beteiligten Reaktionen befassen.

Es wird nicht angestrebt, eine Wasserstoffwirtschaft aufzubauen. Vielmehr werden nachgeschaltete chemische Prozesse mittels Katalyse in der Lage sein, den Wasserstoff in stoffliche Energieträger zu überführen, die wir heute bereits benutzen. Künstliches Erdgas, Olefine als Ausgangsstof-

fe für die chemische Industrie, Düngemittel und flüssige Treibstoffe herkömmlicher Art oder mit optimierten chemischen Strukturen für höchst effizienten Einsatz in konventionellen Triebwerken und Motoren können in „solaren Raffinerien“ hergestellt werden. Sie benötigen außer Wasserstoff und Luft einen Kohlenstoffträger, der fossil, biologisch oder auch  $\text{CO}_2$  sein kann. Einige dieser Prozesse betreiben wir heute schon, wenn wir Erdgas zu Motortreibstoffen im Weltmassstab umwandeln; wir wissen daher, dass es sich dabei um keine Vision, sondern um realisierbare Prozesse handelt. Allerdings benötigen wir auch hier noch erheblichen Forschungsbedarf im Bereich chemischer Technologien und Katalyse, da die heute bekannten Prozesse erheblich unterhalb des möglichen Effizienznieaus arbeiten, teilweise sehr störungsanfällig sind und vor allem Probleme mit der Skalierbarkeit haben.

Die schiere Dimension solcher energiewandelnden Prozesse erfordert eine Neuentwicklung sowohl für größere als auch für viel kleinere Anlagen, die wir dezentral als Energiepuffer betreiben können. Die benötigte Dimension der chemischen Energiespeicherung wird klar, wenn wir uns daran erinnern, dass allein der Ersatz der deutschen Atomspaltungskraftwerke eine Emission von  $\text{CO}_2$  in der Größenordnung 100 Mio t pro Jahr verursacht. Würde man dieses  $\text{CO}_2$  stofflich verwerten, so würde diese sehr regionale und spezielle Aufgabe (nur 25 % der deutschen Emission für Stromproduktion) chemische Anlagen erfordern, wie sie für einige Stoffe (Ammoniak, Ethylen, Methanol) heute jeweils über die ganze Welt verteilt existieren. Wir verfügen für Raffinerieprozesse von Erdöl über Erfahrung in der Konstruktion von Chemieanlagen in der benötigten Größe, die allerdings für den größten Teil ihres Durchsatzes deutlich einfachere chemische Prozesse ausführen als die Totalsynthese von Treibstoffen.

Die solare Raffinerie verarbeitet nicht nur  $\text{CO}_2$ , sondern auch Biomasse, welche selbst als dauerhaft verfügbarer  $\text{CO}_2$ -Sammler und Konzentrator, der mit solarer Energie betrieben wird, angesehen werden kann. Damit steht uns auf Dauer ein Zugang zu Kohlenstoff auch im nach-fossilen Zeitalter offen. Daraus ergibt sich die Anforderung, auch in diesem Sektor ausreichend Forschung zu betreiben, um geeignete Pflanzen, die nicht mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren, zu entwickeln. Solche  $\text{CO}_2$ -Sammler könnten auch schon heute eingesetzt werden, um das  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre zu binden und Lager von mineralischem Kohlenstoff aus diesen Pflanzen zu bilden, die wir der nach-fossilen Zeit überlassen. Die Herausforderung liegt auch hier in der Dimension der Prozesse, welche nicht als Alternative zur Reduktion der Emissionsraten aus fossilen Energieträgern gedacht sind. Dennoch wäre die notwendige Forschung, Entwicklung und

auf mittlere Sicht ihre Anwendung ein sinnvoller Beitrag zu einer insgesamt nachhaltigeren Energieverwendung in globaler Dimension, auch weil wir damit beginnen würden, nicht nur vorgefundene Vorräte zu verbrauchen, sondern auch neue Vorräte für zukünftige Generationen zu bilden.

Die Forderung nach einer generellen „Entkarbonisierung“ der Energiestrukturen ist nicht generell hilfreich. Es dürfte wenig sinnvoll sein, alle auf Kohlenstoff basierenden Energieträger abzubauen, da dies zu unübersehbaren Problemen an vielen Stellen unserer Zivilisation führen würde. Vielmehr sollte man sich des Nutzens dieser Energieträger bewusster werden und sie nicht an Stelle von Energiewandlungsprozessen einsetzen („verfeuern“), die auch andersartig (regenerativ) durchgeführt werden können. Im Bereich der Herstellung von Grund- und Funktionswerkstoffen ist diese Forderung ohnehin grundsätzlich nicht erfüllbar, wenn wir bedenken, dass wir in Zukunft mehr Leistung von allen unseren Werkstoffen verlangen müssen, um die globalen Energieeinsparziele, die wir uns auferlegen, erreichen zu können. Minderwertige Ersatzstoffe, auch wenn sie energie günstiger sind, helfen hier nicht weiter.

Schließlich sehen wir aus Abbildung 1.11, dass Verbrennungsvorgänge, die heute fast ausschließlich unsere Energiewandlung betreiben, auch in Zukunft wichtig sein werden. Daher ist es sowohl aus Gründen der unmittelbar heutigen Effizienzverbesserung, wie auch für die Verbesserung auf lange Sicht erforderlich, Forschung und Entwicklung in diesem bisher scheinbar „unattraktiven“ Bereich der Energiewandlung zu betreiben. Neue Materialien können neue Prozesse erlauben, welche die Gesamteffizienz thermischer Wandlungsvorgänge verbessern. Dieser Weg wurde schon sehr erfolgreich in der Vergangenheit beschritten. Die Daten aus Tabelle 1.3 deuten an, dass dieser Weg noch weiterhin über ein Potenzial verfügt, das wir schnell realisieren sollten. Bessere thermische Prozesse bringen unmittelbar mehr gewandelte Energie für weniger Treibhausgasemission.

## 1.7 Nachwort

Fassen wir die Diskussion entlang der hier dargelegten Linien zusammen, dann entsteht die folgende, vorläufige Liste:

1. Der vollständige Atomausstieg innerhalb von 10 Jahren ist technisch möglich, wenn bestimmte Randbedingungen erfüllt werden.
2. Dies reduziert allerdings die Gefahr der Nukleartechnologie in Mitteleuropa nur geringfügig, solange keine gesamteuropäische Lösung gefunden wird.

3. In Folge von 1. wird sich die CO<sub>2</sub>-Emission Deutschlands in einem Übergangszeitraum gemessen an der Projektion des nationalen Energiekonzepts deutlich erhöhen.
4. Parallel zum Atomausstieg müssen Stromnetzinfrasturktur und Kraftwerkpark erheblich erweitert werden, was allerdings auf längere Sicht ohnehin nötig ist. Dabei darf kein erheblicher gesellschaftlicher Reibungsverlust auftreten.
5. Es bedarf eines politischen Mechanismus, der die Energiewende und die Umsetzung des nationalen Energiekonzepts nachhaltig und dauerhaft begleitet. Neben einer Verifikationsfunktion sollte hier vor allem der Schritt von Konzepten zu verbindlichen Planungen mit Orientierungscharakter für alle Beteiligten vollzogen werden.
6. Die bisher bereits geleisteten Forschungsanstrengungen müssen weiterhin erheblich und nachhaltig gestärkt werden. Neben einem verstärkten Ansatz in den Ingenieurbereichen, die auf technologische Entwicklungen abzielen, ist ein Beitrag der bisher kaum einbezogenen Grundlagenforschung von strategischer Bedeutung. Dieser sollte nicht auf eine einseitige Lösung, sondern auf die Bereitstellung von Optionen ausgerichtet sein. Er muss breit interdisziplinär gefächert sein und von den hier nicht thematisierten Gesellschaftswissenschaften über die Chemie bis in die Biologie reichen. Diese Anstrengungen sind nicht gegeneinander zu priorisieren und können auch nicht auf Kosten einer reduzierten Fusionsforschung verstärkt werden. Die Versorgung mit geeigneten Energieträgern ist eine zentrale Aufgabe der Daseinsvorsorge und muss als Ganzes einen erhöhten Stellenwert in unserer Gesellschaft erhalten.
7. Eine über die vorliegende Darstellung hinausgehende Gesamtbetrachtung ist dringend erforderlich. Eine verstärkte Zusammenarbeit und Anstrengungen zu gemeinsamer Forschung und Bewertung der Energieversorgung sind als Daueraufgabe über die Wissenschaft hinaus von gesellschaftlicher Bedeutung. Die Ergebnisse sind nicht nur innerhalb der Wissenschaft und Industrie zu kommunizieren, sondern vor allem auch mit der Allgemeinheit, deren Ansichten zum Thema Energie wesentliche Elemente der Steuerung der Entwicklung sind, wie die aktuelle Lage im Jahre 2011 beweist. Hier liegen Aufgabenfelder existierender interdisziplinärer Organisationen, die sich in Fortsetzung aktueller Arbeit nachhaltig und dauerhaft des Energiethemas annehmen mögen.

## **Fundstellen der Quellen im Internet**

BMWi:

*[www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html](http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html)*

BDEW:

*[www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_Energiedaten](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten)*

Deutsches Energiekonzept:

*[www.bmu.de/energiekonzept/doc/46394.php](http://www.bmu.de/energiekonzept/doc/46394.php)*

DENA:

*[www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Download/Dokumente/Studien\\_\\_\\_\\_Umfragen/Kurzanalyse\\_KuN-Planung\\_D\\_2020\\_2030\\_kurz.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien____Umfragen/Kurzanalyse_KuN-Planung_D_2020_2030_kurz.pdf)*  
*[www.dena.de/themen/thema-esd/projekte/projekt/dena-netzstudie-ii](http://www.dena.de/themen/thema-esd/projekte/projekt/dena-netzstudie-ii)*

Kraftwerkspark:

*[de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_von\\_Kraftwerken#Deutschland](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Kraftwerken#Deutschland)*

Forschungsstudie Leopoldina/ACATECH:

*[www.leopoldina.org/de/politik/empfehlungen-und-stellungnahmen/nationale-empfehlungen/energieforschungskonzept.html](http://www.leopoldina.org/de/politik/empfehlungen-und-stellungnahmen/nationale-empfehlungen/energieforschungskonzept.html)*



## Kapitel 2

# Smarte Ideen für zukünftige Stromnetze

*Christian Rehtanz*

### 2.1 Kurzfassung

Die stark zunehmende Integration erneuerbarer Energien und der länderübergreifende Stromhandel erfordern zukünftig ein flexibleres Netz. Neue Technologien zur Netzführung und zum Netzausbau auf Transportnetzebene sollen den zusätzlichen Übertragungsbedarf minimieren und gleichzeitig die Versorgungssicherheit aufrecht erhalten. Im Verteilnetz wird der Kunde enger an den Energiemarkt gekoppelt und wird durch sein Verhalten einen Teil der Netzdienstleistungen bereitstellen. Die Kunden werden teilweise selber zum Stromerzeuger und reagieren über Preissignale durch Lastverschiebungen auf das Angebot erneuerbarer Energien. Insbesondere neue Lasten wie Elektrofahrzeuge oder Wärmepumpen gewinnen hierbei eine große Bedeutung. Das Zusammenspiel des flexibleren Netzes, der zentralen und dezentralen Einspeiser sowie der steuerbaren Lasten muss durch eine durchgängige und standardisierte Informations- und Kommunikationstechnik koordiniert werden. Hierdurch kann auch zukünftig eine umweltfreundliche, sichere und wirtschaftliche Energieversorgung erzielt werden.

### 2.2 Energieträger Strom

Betrachtet man die Verwendung von Energie, so wird heute nur ca. 20 % des Energiebedarfs durch elektrische Energie gedeckt. Für jegliche Effizienzbetrachtungen muss immer auch die Verschiebung zwischen den Energieträgern berücksichtigt werden. In einzelnen Bereichen wie beispielsweise der Elektromobilität kann durch eine Verschiebung von konventionellen Antrieben hin zur Elektrizität ein Effizienzgewinn und damit auch Umweltgewinn im Sinne einer verringerten CO<sub>2</sub>-Emission erzielt werden. Die CO<sub>2</sub>-Emission sinkt zum Beispiel auf ca. 90 g CO<sub>2</sub>/km bei Ladung von Elektrofahrzeugen bei einer Erzeugung mit dem deutschen Strommix.

Ein weiteres Beispiel sind stromgespeiste Wärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden, die bei geeigneten Bedingungen und zusammen mit einer guten Gebäudeisolation energieeffizient arbeiten. Beide Beispiele verdeutlichen eine Verschiebung der Energieverwendung hin zum Strom.

Wenn man sich vor Augen führt, welche Energieträger langfristig zur Verfügung stehen, dann wird der elektrische Strom zunehmend an Bedeutung gewinnen. Regenerative Energien wie Windenergie, Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke werden in zunehmendem Maße die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern ablösen und direkt Strom als Energieträger bereitstellen. Die Kernenergie oder langfristig auch die Kernfusion zielen in dieselbe Richtung. Der flexiblen Verwendbarkeit und leichten Umwandelbarkeit des elektrischen Stroms steht jedoch der Nachteil der geringen oder nicht effizienten Speicherbarkeit entgegen. Darüber hinaus muss auch ein effizientes Netz zur Verfügung stehen.

### 2.3 Anforderungen an Stromnetze

Aus dieser Ausgangssituation heraus ergeben sich die zukünftigen Anforderungen an die europäische Energieversorgung und insbesondere das Stromnetz. Das Netz dient hierbei insbesondere als europäischer Marktplatz und zugleich als Integrationsplattform für regional bereitstehende erneuerbare Energien.

Heute zeichnet sich diese Situation bereits durch vielfältige europäische Engpässe zwischen den Netzgebieten und auch durch eine zunehmende Netzbelastung durch sich verlagernde Kraftwerksstandorte und insbesondere den Windenergieausbau ab. Das gewünschte europäische Marktgeschehen bedingt ein enges miteinander verknüpftes Netz. Vor der Marktöffnung waren die Netzkopplungen auf eine gegenseitige Aushilfe im Fehlerfall beschränkt. Heute soll massiver Stromaustausch zwischen den Märkten stattfinden, so dass neue Leitungskapazitäten benötigt werden.

Speziell in Deutschland ist eine starke Verlagerung der Kraftwerkseinspeisungen zu beobachten. Wurden in der Vergangenheit Kraftwerke eher in der Nähe des Energiebedarfs gebaut, so entfällt durch die Entflechtung zwischen Erzeugern und Netz dieser Anreiz heute völlig. Kernkraftwerke, die in Süddeutschland eine regionale Versorgung übernommen haben entfallen aufgrund der politischen Entscheidung. Neue Kraftwerke werden, bedingt durch eine günstige Anbindung an Importrohstoffe, überwiegend im Norden gebaut. Der massive Windenergieausbau in Norddeutschland und in der Nord- und Ostsee verstärken diesen Effekt.

Die Vision der europäischen Netze lebt also von einem uneingeschränkten europäischen Markt und durch die Nutzung von regenerativen Ressourcen, die regional anfallen. Windenergie in Deutschland und Spanien, Wasserkraft aus Norwegen und der Alpenregion, Solarenergie aus Südeuropa kombiniert mit einem gesunden Kraftwerksmix aus vorhandenen Energieressourcen wie Braun- und Steinkohle sowie Gas und auch Kernenergie werden die europäische Energieversorgung auf vielfältigere Beine stellen. Es ist jedoch hierbei zu beachten, dass der Energieübertragung immer auch physikalische Grenzen gesetzt sind. Eine Stromübertragung über Tausende von Kilometern bringt unabhängig von der Technologie immer auch stark steigende Verluste mit sich, so dass jede Region für sich eine gewisse Erzeugung und einen gewissen Mix benötigt.

Geht man von der europäischen Betrachtung hinunter auf die Ebene der Verteilnetze, so ändern sich aber auch hier die Anforderungen. Dezentral verteilte Kleinsterzeuger müssen in das Netz eingebunden werden. Die Verbraucher bzw. Kunden müssen stärker in den Markt integriert werden. Durch Effizienzbestrebungen ist es unerlässlich, dass der momentane Wert der elektrischen Energie für den Verbraucher sichtbar gemacht wird. Tarife müssen sich flexibel dem Stromangebot anpassen. Elektrofahrzeuge als verteilte Energiespeicher müssen geeignet in das System integriert werden. Hierbei sind wiederum die technischen Randbedingungen und die Auswirkungen auf das Netz als auch die energiewirtschaftlichen Aspekte zu betrachten.

Tabelle 2.1: Anforderungen und Trends in elektrischen Energienetzen

<i>Land</i>	<i>Marktplatz</i>	<i>Integrationsplattform</i>
<i>zentral</i>	Engpassbeseitigung - unterirdische Kabel - Blackout-Vermeidung	Offshore-Windenergie - Netzanbindung
<i>dezentral</i>	Endkundenbeteiligung - Smart Metering - E-Energy	Koordination von (Kleinst-) Erzeugern und Verbrauchern - Kraft-Wärme-Kopplung - Grid for Vehicles (G4V)

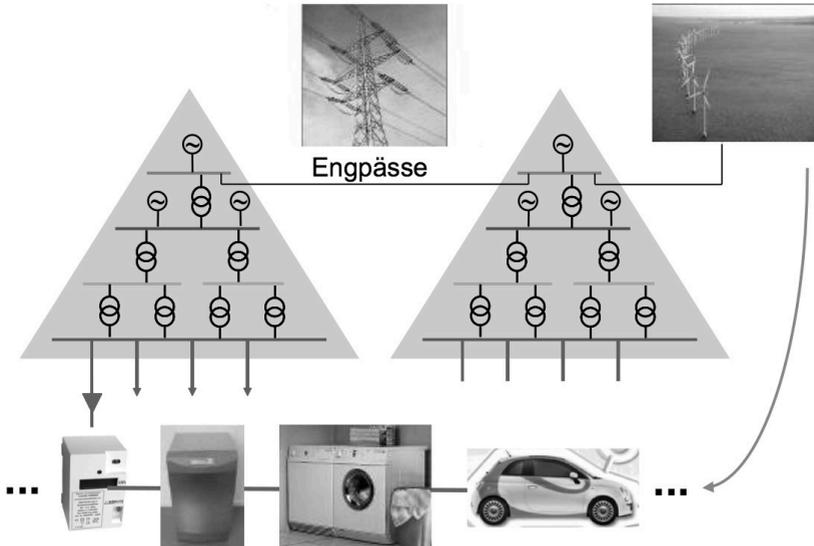


Abbildung 2.1: Struktur der Anforderungen an elektrische Netze

Insgesamt spannen sich somit eine Reihe von Aktionsfeldern für die zukünftigen Energienetze auf, denen durch Innovationen im Netz begegnet werden muss. Im Folgenden werden einzelne herausgegriffene Innovationen für diese Herausforderungen dargestellt.

## 2.4 Innovationen gegen Netzengpässe

Um Netzengpässe zu vermeiden oder zu verringern muss zunächst einmal die Übertragungskapazität genau bestimmt werden. Die Übertragungskapazität hängt stark von der aktuellen Netzsituation ab. Ausfälle von Netzelementen müssen berücksichtigt werden, aber auch Veränderungen von Einspeisungen oder auch Witterungseinflüsse gehen in die Bestimmung ein. Betriebsmittel, die gewartet werden, stehen dem Netz nicht zur Verfügung. Reserve- und Regelleistung bei ausgefallenen Kraftwerken muss jederzeit übertragen werden können. Aus diesen Anforderungen folgt, dass in der Planung wesentlich mehr Netz geplant werden muss, als typischerweise nutzbar im Betrieb zur Verfügung steht. Wie viel genau in einer bestimmten Betriebsituation zur Verfügung steht, kann entweder durch

dynamische, zeitabhängige Simulations- und Stabilitätsrechnungen (Dynamic Stability Assessment) oder durch Messungen der aktuellen Situation ermittelt werden. Beides sind innovative Ansätze, die sich teilweise noch in der Entwicklung befinden. Darüber hinaus können Leistungsflüsse gezielt beeinflusst werden, um das bestehende Netz optimal zu nutzen. Wenn das bestehende Netz jedoch an seine Grenzen stößt, dann hilft nur noch ein gezielter Ausbau. Aber auch hier stehen innovative Technologien zur Verfügung.

### 2.4.1 Weitbereichsmonitoring

Eine Technologie im Bereich einer besseren Systemüberwachung, die sich mehr und mehr durchsetzt, ist das zeitsynchronisierte Weitbereichsmonitoring [1]. Strom- und Spannungsmesswerte werden zeitlich hoch aufgelöst und durch ein GPS Satellitensignal zeitsynchronisiert ermittelt. Hierdurch werden nicht nur die Beträge der Größen, sondern auch deren Phasenwinkel bestimmt. Dynamische Phänomene wie Systemschwingungen aber auch andere Arten von Stabilitätsaspekten können frühzeitig ermittelt werden.

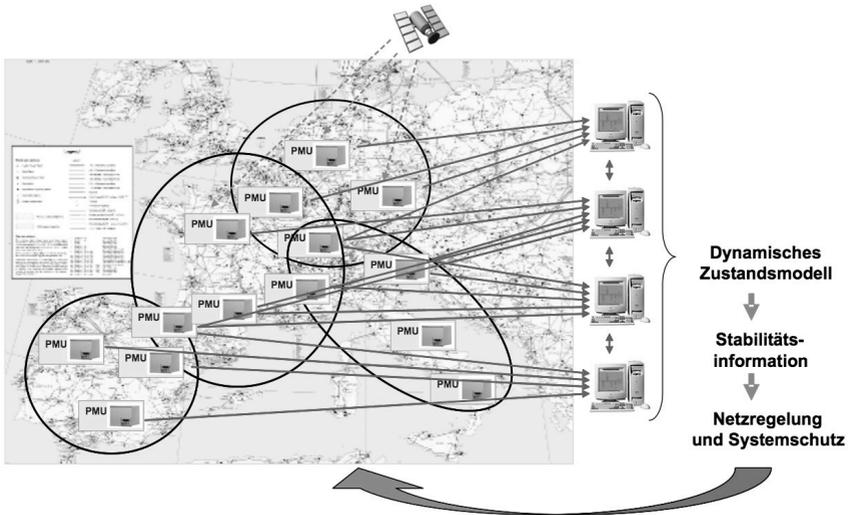


Abbildung 2.2: Vision eines europäischen Weitbereichsmonitoring

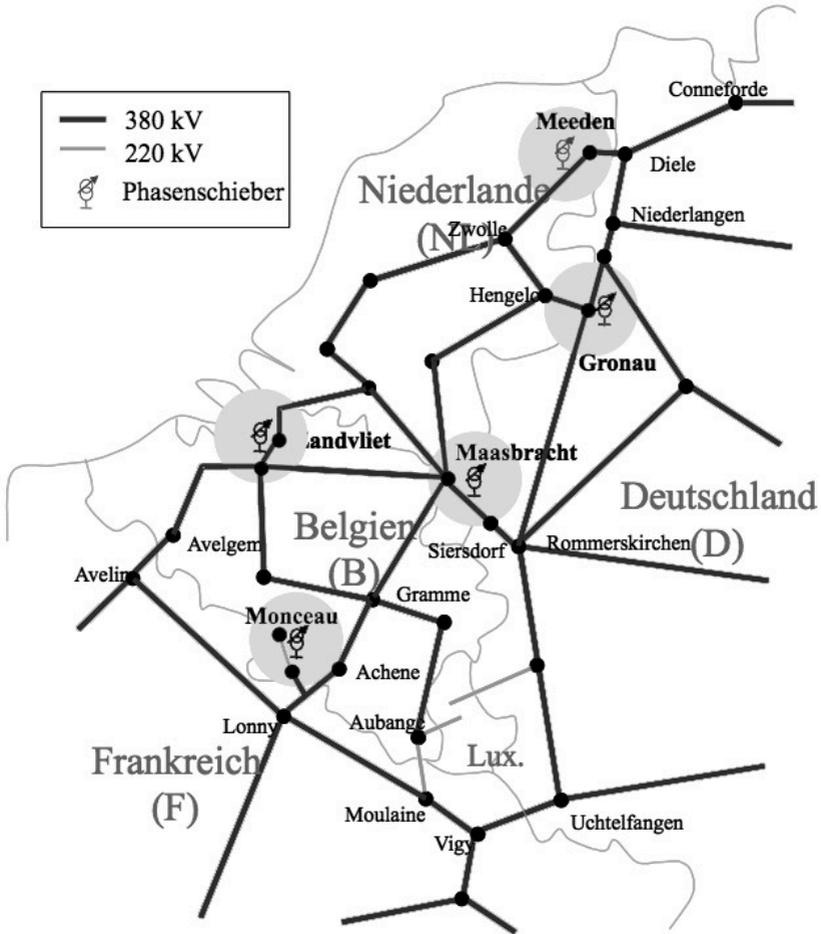


Abbildung 2.3: Koordination von Lastflussreglern im Beneluxraum

Mit dieser Technologie ist auch eine thermische Leitungsüberwachung möglich. Zu diesem letzten Punkt stehen aber auch vielfältige alternative Technologien zur Verfügung. Die thermische Leitungsüberwachung gewinnt zunehmend an Bedeutung, da bei witterungsbedingter Kühlung von Leitungen signifikant mehr Leistung übertragen werden kann. Diese Überwachung ist jedoch primär eine betriebsbedingte Maßnahme und kann nicht bei der Netzdimensionierung betrachtet werden, da die Kühlung und damit die Übertragungsleistung nicht garantiert ist.

#### **2.4.2 Lastflusssteuernde Betriebsmittel**

Eine weitere Innovation zur besseren Ausnutzung bestehender Netze ist die gezielte Lastflusssteuerung. Schrägregelnde Transformatoren oder auch leistungselektronische Netzregler (FACTS) stehen hierfür zur Verfügung. Wenn sich auf bestimmten Leitungen Engpässe abzeichnen, dann können diese Betriebsmittel die Leistungsflüsse gezielt verändern. Bei einer Systemüberwachung durch das oben erwähnte Weitbereichsmonitoring kann kritischen Systemzuständen gezielt entgegengewirkt werden. Bei schnellen Netzreglern kann auch nach Betriebsmittelausfällen die Kapazität des verbleibenden Netzes optimiert werden, so dass keine weiteren Schutzabschaltungen erfolgen. Die Komponenten zur Lastflusssteuerung sind in der Praxis verfügbar und auch schon vielfältig eingesetzt, jedoch befindet sich die zugehörige Weitbereichsregelung noch in der Entwicklung.

#### **2.4.3 Hochspannungsgleichstromübertragung mit selbstgeführten Umrichtern**

Die bislang beschriebenen Maßnahmen sind jedoch eher betrieblicher Natur und erhöhen die permanent verfügbare Übertragungskapazität entweder gar nicht oder nur geringfügig. Wenn also die Netzkapazität signifikant erhöht werden muss, dann bleibt nur noch der Zubau von neuen Leitungstrassen.

Neben den konventionellen Drehstromfreileitungen wird mehr und mehr die Anforderung zum Ausbau als Kabelverbindung formuliert. Drehstromkabelsysteme bei hohen Spannungen und größeren Entfernungen sind jedoch sehr aufwändig und es bestehen nur begrenzte Betriebserfahrungen. Als Alternative bieten sich hierzu Hochspannungsgleichstromübertragungen (HGÜ) mit selbstgeführten Umrichtern und Polymerkabeln an. Diese innovative Technologie dringt seit einigen Jahren in immer höhere Leistungsklassen vor und ist heute bis knapp über 1000 MW Übertragungsleistung kommerziell verfügbar. Die Polymerkabel sind leicht zu verlegen

und können als See- oder Landkabel verwendet werden. Erste Projekte haben bereits europäische Märkte gekoppelt und sind erfolgreich in Betrieb wie z.B. ein Kabel zwischen Estland und Finnland mit gemischter Land- und Seeverlegung und einer Leistung von 350 MW [2]. Hierbei kommt ein Kabelpaar bestehend aus zwei Kabeln mit direkter Erdverlegung zum Einsatz.

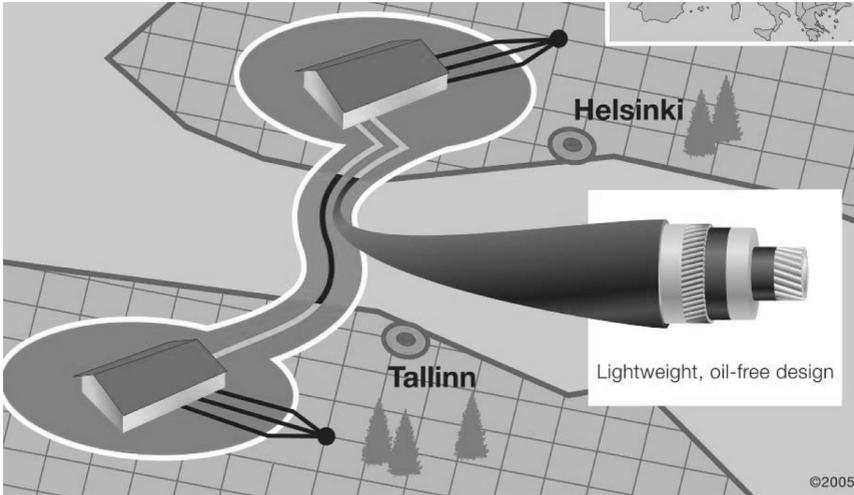


Abbildung 2.4: HGÜ-Installation zwischen Estland und Finnland (Quelle ABB)

Der Vorteil dieser Technologie ist neben der vergleichsweise einfachen Kabelverlegung insbesondere die Regelbarkeit der Leistungsflüsse und die netzstabilisierende Eigenschaft der beiden Umrichter an den Enden der HGÜ. Durch die Leistungsflussregelung wird eine Überlastung der Leitung beim Ausfall paralleler Leitungen vermieden. Kommt es zu Störungen im Netz, so wird die HGÜ nicht in Überlastabschaltung gehen, wie es bei einer konventionellen Leitung bei Überlastung der Fall wäre. Hierdurch können kaskadierende Ausfälle vermieden werden. Darüber hinaus ist an beiden Enden eine unabhängige Spannungs- und Blindleistungsregelung möglich, die das umliegende Netz stabilisiert und auch die Verluste reduziert. Zur Dimensionierung und Auslegung eines Gesamtsystems mit HGÜ müssen diese Aspekte berücksichtigt werden, um den Vorteil einer solchen Lösung genau bewerten zu können. In der Praxis ergibt sich hieraus, dass gegen-

über einer Drehstromleitung eine HGÜ-Lösung mit geringerer Leistung zur Bereitstellung derselben nutzbaren Netzkapazität ausreicht. Nimmt man diesen Aspekt hinzu, dann kann diese Technologie bei dem Bedarf nach einer unterirdischen Stromübertragung eine innovative und wirtschaftliche Lösung darstellen.

## 2.5 Netzintegration von Windenergie

Neben der Vermeidung von Netzengpässen stellt im Netzbereich die Integration erneuerbarer Energien eine große Herausforderung dar. Insbesondere die Integration von Offshore-Windenergie benötigt netzplanerische und betriebliche Innovationen.

### 2.5.1 HGÜ zur Offshore-Anbindung

Bei der Integration von Offshore-Windenergie sind Kabeltrassen über mehrere zehn bis zu über einhundert Kilometern erforderlich. Befindet sich der nächstliegende Anschlussknoten an Land nicht direkt in Küstennähe, dann kommen noch größere Entfernungen zustande. Idealerweise wird die Kabelverbindung auch an Land weitergeführt, um die Umwelteinflüsse auch hier zu minimieren. Bei derartigen Anwendungen bieten sich wiederum HGÜ mit selbstgeführten Umrichtern an. Auf der Landseite stützt der Umrichter das im Küstenbereich häufig eher schwache Netz, und auf der Seeseite kann der Blindleistungshaushalt mit den Windkraftanlagen ausgeglichen werden. Da bei HGÜ die Verluste im Kabel sehr gering sind, ist eine Weiterführung des Kabels für die Gesamtverlustbetrachtung günstig.

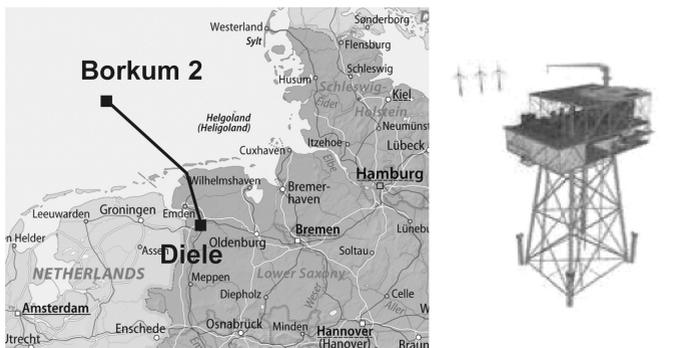


Abbildung 2.5: HGÜ zur Offshore-Anbindung

Bei der Transpower Stromübertragungs-GmbH (vormals E.ON Netz) befindet sich eine erste dieser Offshore-Anbindungen in der Realisierung mit Inbetriebnahme 2009. Die Übertragungsleistung beträgt 400 MW bei einer Gleichspannung von +/- 150 kV und einer Drehspannung von 170 kV offshore und 380 kV onshore. Die Kabellänge beträgt 128 km auf See plus 75 km auf Land. Die kompakte Bauweise der Umrichterstation ermöglicht eine Errichtung auf einer Umrichterplattform auf See.

### 2.5.2 Probabilistische Netzplanung

Neben neuen Technologien für das Netz wird eine Betrachtung der volatilen Vorgänge im Netz und deren Berücksichtigung bei der Planung immer wichtiger. Die Volatilität der Vorgänge kommt einerseits durch die zunehmende Windeinspeisung, aber andererseits auch durch das Marktgeschehen als solches zustande [3]. Gegenüber der heute angewandten szenarienbasierten Netzplanung berücksichtigt die probabilistische Netzplanung die Verteilungen der Einspeisungen und berechnet hieraus die Häufigkeitsverteilungen der Netzauslastung [4]. Als Ergebnis kann abgelesen werden, zu welchem Prozentsatz der Zeit eine Leitungstrasse überlastet wird und ob sich hieraus die Investition in eine Netzerweiterung ableiten lässt. Ist die Zeitdauer einer Verletzung der N-1 Sicherheit und damit einer zu geringen Netzkapazität zu hoch, dann muss in das Netz investiert werden. Ist die Zeitdauer jedoch gering, so kann mit alternativen Engpassmanagementmaßnahmen wie einem temporären Redispatch der Einspeisungen entgegengewirkt werden. Im Betrieb könnte gegebenenfalls das am Anfang erwähnte Leitungsmonitoring sogar diese Maßnahmen unnötig machen. In Summe wird durch die probabilistische Planung verdeutlicht, welche Netzausbaumaßnahmen am dringendsten und notwendigsten sind. Diese Art der Netzplanung findet gerade erst den Übergang von der Theorie in die Praxis.

## 2.6 Innovationen für eine dezentrale Energieversorgung

Neben der Betrachtung der Transportnetze und der transeuropäischen Energiemärkte verändert sich auch zunehmend die Versorgungsaufgabe der Verteilnetze. Kunden sollen näher mit dem Marktgeschehen verbunden werden und dezentrale Einspeiser und Speicher wie auch zukünftige Elektrofahrzeuge sollen in das Netz und den Markt integriert werden.

### 2.6.1 E-Energy

Eine Projektinitiative des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) mit dem Thema E-Energy nimmt sich dieser Thematik an. Durch die konsequente Verwendung neuester Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sollen Endkunden näher in den Energiemarkt integriert werden und durch zusätzliche Informationen zu energieeffizientem Verhalten angehalten werden.

Eine erste Stufe in diese Richtung ist die Einführung von fernauslesbaren Stromzählern (Smart Metering). Der aktuelle Verbrauch oder auch Verbrauchsstatistiken können hiermit jederzeit dem Kunden angezeigt werden. Eine Stufe weiter gehen flexible Tarife, die dann bei dementsprechender dezentraler Intelligenz zu einer mehr oder weniger automatisierten Verbrauchsverschiebung und -anpassung führen. Die fernauslesbaren Zähler werden durch zunehmende Funktionen zu sogenannten IKT-Gateways, die den Kunden mit dem Marktplatz verbinden.

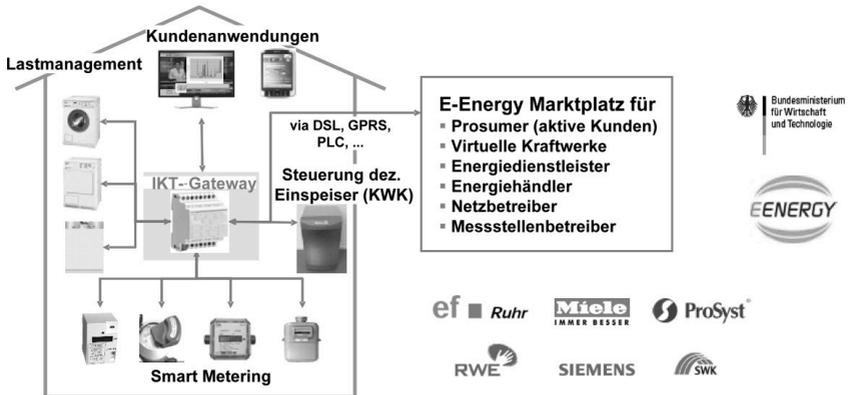


Abbildung 2.6: E-Energy Projekt „E-DeMa“

Im Rahmen des E-Energy-Projekts „E-DeMa“ wird ein derartiger E-Energy Marktplatz geschaffen [5]. Stromkunden (Privat- und Gewerbe-kunden) werden an diesen offenen elektronischen Marktplatz mittels IKT-Gateways mit Energiehändlern, Verteilnetzbetreibern und weiteren Akteuren innerhalb einer Modellregion im Rhein-Ruhr-Gebiet verbunden. Aus diesem Marktplatz ergeben sich neue Geschäftsmodelle für eine aktivere Marktteilnahme der Akteure. Dabei werden im Kern Aspekte der Netzbe-

triebsführung, Inhouse-Anwendungen, zeitnahe Verbrauchsdatenerfassung und -bereitstellung berücksichtigt. Technische Herausforderungen sind insbesondere die Bereiche des Netzeinflusses (Smart Grid) sowie die gesamte IKT-Infrastruktur (IKT-Gateway inkl. Smart Metering). Die Komponenten werden informations- und kommunikationstechnologisch unter besonderer Beachtung von Netzaspekten zu einem Marktplatz zusammengeführt.

### 2.6.2 Dezentrale Erzeuger-Last-Koordination

Das weitergehende Ziel dieses und der weiteren E-Energy-Projekte ist die Verbindung der Kunden mit dem fluktuierenden Angebot aus regenerativen Quellen. Durch die zu erstellenden Marktmechanismen soll eine Harmonisierung zwischen dem Erzeugungsangebot und den Lasten geschaffen werden, um kostspielige Ausgleichs- und Veredelungsmaßnahmen für die fluktuierenden Quellen zu vermeiden. Die Einbindung von Elektrofahrzeugen, die als steuerbare Lasten und Energiespeicher fungieren, wird hierbei zusätzlich eine wesentliche Rolle spielen.

Die Auswirkungen einer großen Zahl von Elektrofahrzeugen auf die Netze muss frühzeitig bei der Einführung von Elektrofahrzeugen berücksichtigt werden. Große Ladeleistungen und damit eine schnelle Fahrzeugaufladung sind bei Millionen von Fahrzeugen nur koordiniert mit dem Netz und einem Lastmanagement möglich. Eine gegründete Grid-for-Vehicles (G4V) Initiative von europäischen Netzbetreibern und Forschungsstätten nimmt diese Problematik bereits heute auf [6].

In Summe ist somit zukünftig mehr und mehr eine kombinierte Betrachtung und dezentrale koordinierte Steuerung von Strom-/Wärmequellen, Netzen, Fahrzeugen und Speichern zu erzielen. Neben dem Strombedarf müssen somit auch der Wärmebedarf und der Mobilitätsbedarf in die Planung der zugehörigen Netze und Infrastrukturen mit einbezogen werden. Des Weiteren sind neben der IKT-Infrastruktur auch neue dezentrale Steuerungsalgorithmen erforderlich. Alle Daten von Millionen von dezentralen Komponenten zentral zu optimieren wird nicht zielführend sein. Daher ist es erforderlich, einen gewissen Grad an dezentraler Selbstkoordination der Anlagen zu erreichen. Innerhalb bestimmter Netzgebiete und gesteuert durch Tarife von außen, werden Anlagen (Einspeisungen und Lasten) erkennen, ob deren Verhalten wirtschaftlich optimal ist oder ob zeitliche Verschiebungen vorgenommen werden können. Eine derartige Koordination ist insbesondere auch für neue Komponenten im Netz, wie Elektrofahrzeuge erforderlich. Nur durch eine derartige dezentrale Ko-

ordination können große Anzahlen von Einzelkomponenten gehandhabt werden.

## 2.7 Zusammenfassung

Wenn man die Anforderungen an zukünftige Netze als Marktplatz und Integrationsplattform für erneuerbare Energien betrachtet, so ergeben sich immense technologische Herausforderungen, die nur durch Innovationen gelöst werden können.

Auf der Transportnetzebene müssen neue Technologien wie das Weitbereichsmonitoring oder die koordinierte Lastflusssteuerung die Netzführung unterstützen, und neue Anlagen wie die exemplarisch genannte HGÜ mit selbstgeführten Umrichtern müssen Netzengpässe schließen. In der Planung müssen derartige Technologien berücksichtigt werden, so dass deren vielfältige Fähigkeiten genutzt werden. Neben der szenarienbasierten Planung werden probabilistische Planungen die Volatilität der Strommärkte und regenerativer Erzeuger geeignet berücksichtigen.

Auf Verteilnetzebene werden Kunden flexible Tarife und eine engere Kopplung mit der Erzeugung erfahren. Der Zeitwert der elektrischen Energie wird sich auch am Hausanschluss widerspiegeln, so dass eine dezentrale Koordination der Eigenerzeugung, des Wärme- und Strombedarfs und der Fahrzeugaufladung mit den Netz- und Marktbedingungen erforderlich ist. Erst durch die Lösung dieser Aspekte wird sich die gewünschte Effizienz einer zunehmend regenerativen Energieversorgung erzielen lassen.

## Literatur

- [1] C. Rehtanz and P. Pouyan, eds., *Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement, CIGRE-Report, Working Group 601, Study Committee C4*. Januar 2007.
- [2] [www.nordicenergylink.com](http://www.nordicenergylink.com).
- [3] D. Waniek, C. Rehtanz, and E. Handschin, “Analysis of Market Coupling Based on a Combined Network and Market Model,” in *Proc. IEEE PowerTech Conference*, (Bukarest, Rumänien), 2009.
- [4] J. Schwippe, O. Krause, and C. Rehtanz, “Probabilistic Load Flow Calculation Based on an Enhanced Convolution Technique,” in *Proc. IEEE PowerTech Conference*, (Bukarest, Rumänien), 2009.
- [5] [www.e-dema.com](http://www.e-dema.com).

[6] *[www.grid-for-vehicles.eu](http://www.grid-for-vehicles.eu); [www.g4v.eu](http://www.g4v.eu).*

## Kapitel 3

### Energie aus der Tiefe: Geothermie

*Rüdiger Schulz*

#### 3.1 Geothermische Energie weltweit

*Geothermische Energie* (synonym Erdwärme oder Geothermie) ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde [1].

Unter den regenerativen Energiequellen nimmt die geothermische Energie eine Sonderstellung ein, da sie ganzjährig und zu jeder Tageszeit zur Verfügung steht und daher im Grundlastbereich eingesetzt werden kann. In Ländern mit günstigen geothermischen Bedingungen, z.B. in den zirkumpazifischen Staaten, in Island oder Italien, nutzt man die geothermische Energie bereits seit mehreren Jahrzehnten für die Stromerzeugung zu konkurrenzfähigen Preisen (Abbildung 3.1), in der Toskana schon seit über 100 Jahren. Die weltweit installierte geothermische Kraftwerksleistung liegt derzeit bei rund 11.000 MW [2]. In 24 Staaten wird geothermischer Strom erzeugt; die größten Produzenten (Stand 1.1.2010) sind die USA (3093 MW), die Philippinen (1904 MW), Indonesien (1197 MW), Mexiko (958 MW) und Italien (843 MW). Die jährliche Wachstumsrate liegt bei ca. 4 % (Abbildung 3.2).

Eine weit größere Verbreitung als die Stromerzeugung hat die geothermische Wärmebereitstellung (Abbildung 3.3). In 78 Staaten sind ca. 50.000 MW installiert [3]. In knapp der Hälfte der Länder, wozu auch Deutschland gehört, beträgt die Wärmeleistung mehr als 100 MW.

#### 3.2 Geothermische Energie als heimische Energiequelle

Wie der internationale Überblick zeigt, kann geothermische Energie ganz unterschiedlich genutzt werden. In Mitteleuropa fehlen allerdings aus geologischen Gründen die hydrothermalen Lagerstätten (vgl. Abbildung 3.4).

Bei der oberflächennahen Geothermie [1] wird die Energie dem oberflächennahen Bereich der Erde (meist bis 150 m, max. bis 400 m Tiefe)



Abbildung 3.1: Lage der geothermischen Kraftwerke zur Stromerzeugung; im „Feuergürtel“ rund um den Pazifik befinden sich die meisten hydrothermalen geothermischen Lagerstätten (Dampf- oder Hochdruckwassersysteme)

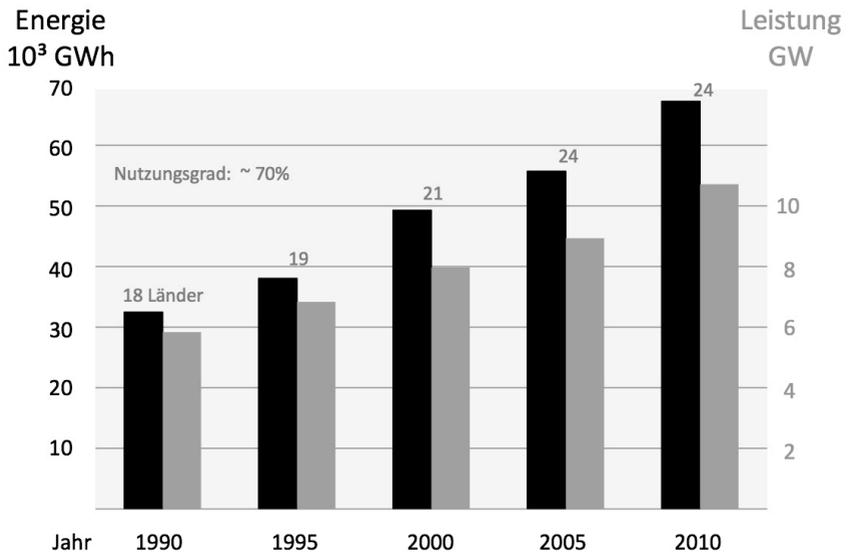


Abbildung 3.2: Weltweit installierte geothermische Kraftwerksleistung und erzeugter Strom (nach [2]); Angabe jeweils zum 1. Jan. des entsprechenden Jahres. Von 1990 bis 2010 nahm die Anzahl der Länder mit geothermischer Stromerzeugung von 18 auf 24 Länder zu.

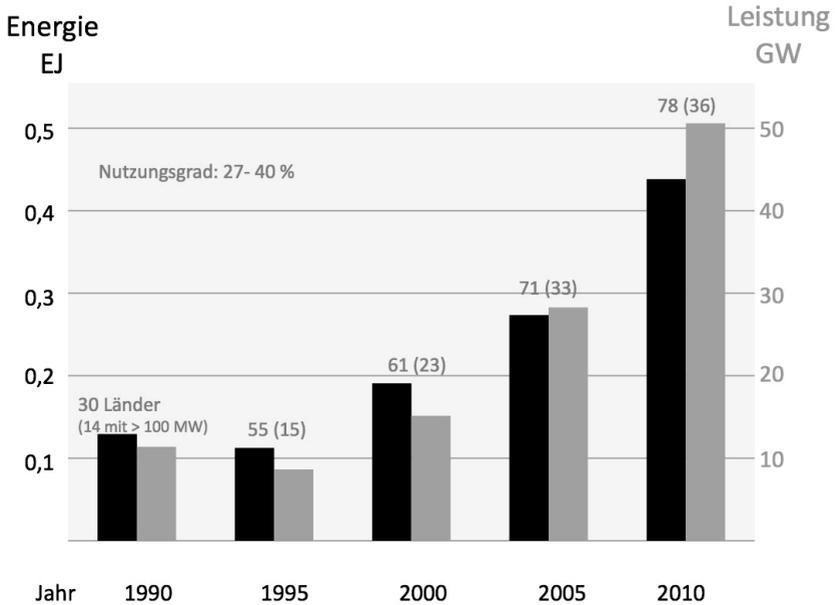


Abbildung 3.3: Weltweit installierte geothermische Wärmeleistung und bereitgestellt Wärme (nach [3]); Angabe jeweils zum 1. Jan. des entsprechenden Jahres. Von 1990 bis 2010 nahm die Anzahl der Länder mit geothermischer Wärmebereitstellung von 30 auf 78 Länder zu.

entzogen, z.B. mit Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbohrungen oder Energiepfählen; eine energetische Nutzung ist in der Regel nur mit Wärmepumpen möglich. In der tiefen Geothermie [4] wird die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen und meist direkt, d.h. ohne Niveauanhebung, genutzt. Die in tiefen Aquiferen gespeicherten heißen ( $> 100\text{ °C}$ ), warmen ( $60\text{-}100\text{ °C}$ ) oder thermalen ( $> 20\text{ °C}$ ) Wässer werden meist direkt (gegebenenfalls über Wärmetauscher) zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen, für landwirtschaftliche, industrielle oder balneologische Zwecke genutzt.

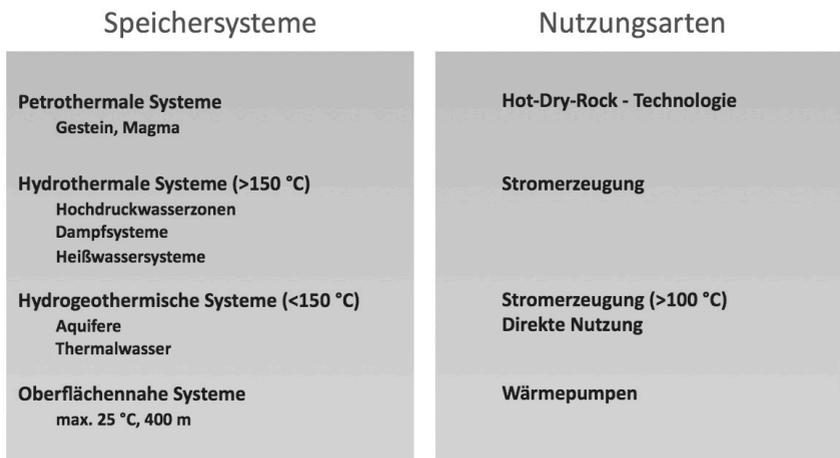


Abbildung 3.4: Überblick über die verschiedenen geothermischen Speichersysteme (Lagerstätten) und ihre Nutzungsarten.

Moderne Wandlungstechniken, wie ORC-Verfahren und Kalina-Zyklus, ermöglichen heute die Stromerzeugung bei Temperaturen ab ca.  $100\text{ °C}$ . Damit wird die geothermische Stromerzeugung auch für „normale“ geothermische Regionen wie Mitteleuropa interessant. Bisher wurde in diesem Temperaturbereich die geothermische Energie nur für die direkte Wärmenutzung, z.B. für Heiz- und Prozesswärme, verwendet. Die Zukunftschancen für eine geothermische Stromerzeugung in Deutschland hat das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) in einem Gutachten [5] [6] abgeschätzt. Drei Reservoirtypen - Heißwasseraquifere, Störungen und kristalline Gesteine - wurden als nutzbar eingestuft. Allein für die Heißwasseraquifere (hydrogeothermische Systeme), dem Reservoir

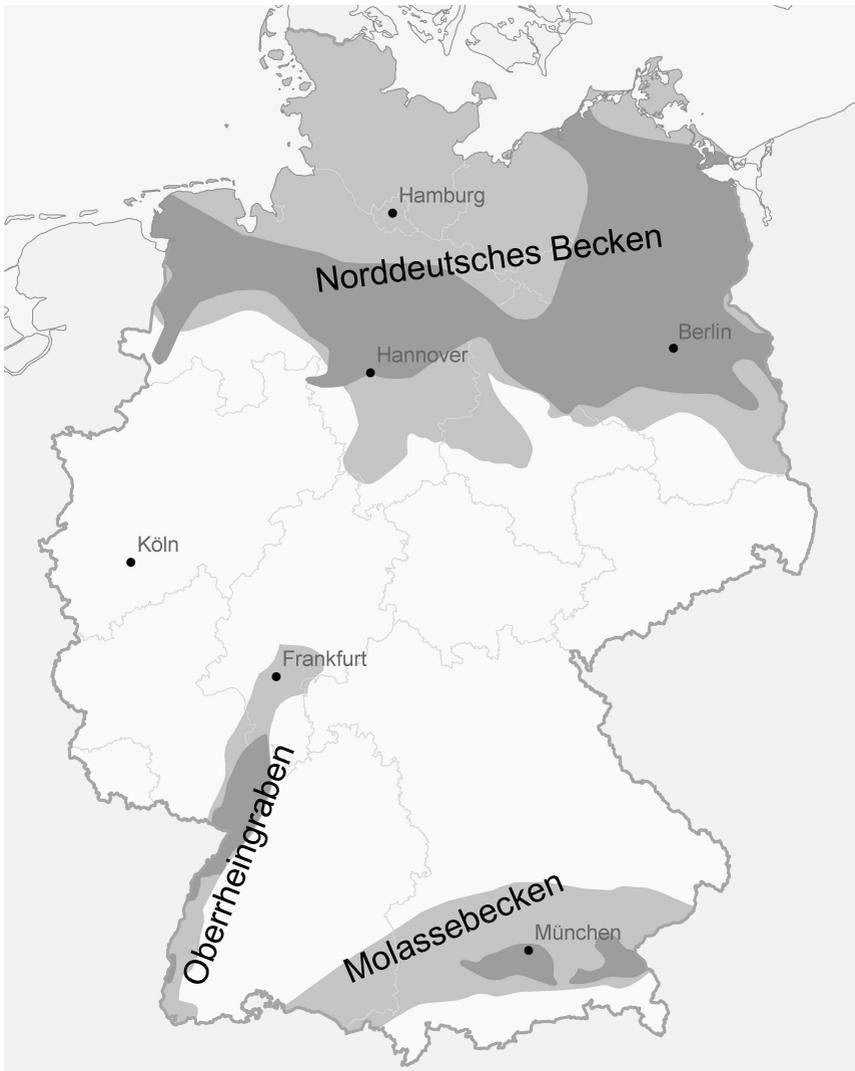


Abbildung 3.5: Aquifer-Nutzung in Deutschland: Übersicht über Gebiete, die für hydrogeothermische Nutzung möglicherweise geeignet sind: Regionen mit Aquiferen, deren Temperatur über 100 °C (rot), bzw. über 60 °C (gelb) beträgt. 100 °C ist für eine Stromerzeugung, 60 °C für die direkte Wärmenutzung erforderlich.

mit dem geringsten Potenzial, liegt nach dem TAB-Bericht das Strompotenzial in Deutschland bei 9 EJ; das Wärmepotenzial bei der Kraft-Wärme-Kopplung beläuft sich auf 23 EJ.

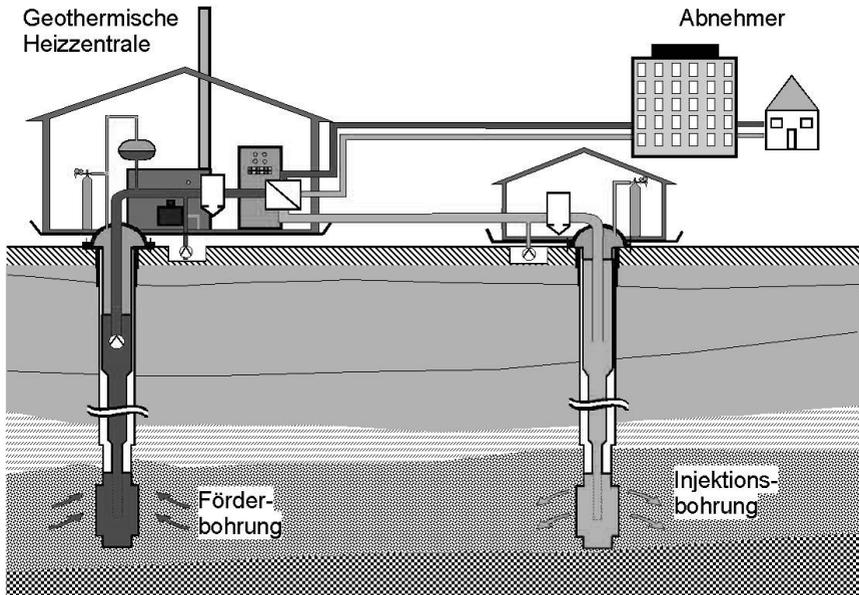


Abbildung 3.6: Prinzipbild für eine tiefe geothermische Anlage: Eine Dublette, bestehend aus Förder- und Injektionsbohrung; je nach Aquifer sind die Bohrungen 1.500 bis 5.000 m tief; die installierte Leistung beträgt abhängig von Temperatur und Förderrate  $2-60 \text{ MW}_t$ , bei der Verstromung typischerweise zwischen  $3-7 \text{ MW}_e$ .

Erste Erfahrungen für diese Art der Stromerzeugung liegen in Deutschland aus vier geothermischen Kraftwerken in Neustadt-Glewe (Mecklenburg-Vorpommern), Unterhaching, Simbach (beide Bayern) und Landau (Rheinland-Pfalz) vor, deren installierte Leistungen aber nur bei etwa  $7 \text{ MW}_e$  liegen. Weitere Anlagen befinden sich in der Bauphase. Die wichtigsten Regionen für eine hydrogeothermische Nutzung in Deutschland sind das Norddeutsche Becken, der Oberrheingraben und das Süddeutsche Molassebecken (Abbildung 3.5); in diesen geologischen Sedimentstrukturen sind entsprechende tiefe, Grundwasser führende Schichten (Heißwas-

seraquifere) nachgewiesen. Zur reinen Wärmenutzung existieren 12 größere Anlagen (Fernwärme) sowie mehrere kleine Anlagen (Thermalbäder, Gewächshäuser mit einer installierten Leistung von ca. 145 MW<sub>t</sub>, Stand Ende 2009).

Die Heißwasseraquifere sind hochpermeable Gesteinsschichten, deren Mächtigkeit von einigen Dekametern bis zu hundert Metern oder mehr reicht und deren Wassertemperaturen mehr als 100 °C betragen. Es handelt sich entweder um hochporöse Sandsteine oder um andere stark geklüftete oder verkarstete Sedimentgesteine. In Karbonatgesteinen können bevorzugte Fließpfade auf Kluftflächen durch Lösung zu Karsthohlräumen erweitert sein. Bilden diese untereinander ein durchgängiges Netz, haben die Gesteinsschichten eine außerordentliche hohe Durchlässigkeit, die im regionalen Maßstab durchhalten kann.

Die Aquifere werden geothermisch meist mit Dublettensystemen (Abbildung 3.6) erschlossen. Bei einer Dublette wird in der Produktionsbohrung Heißwasser gefördert, häufig mit Hilfe einer Unterwasser-Pumpe. Die Wärme wird an der Oberfläche mittels eines Wärmetauschers auf einen Sekundärkreislauf übertragen, in dem der Dampf für die Stromgewinnung erzeugt werden kann oder aus dem direkt oder mit der Kraftwärmekoppelung Wärme für Raumheizung, Brauchwasser oder Prozesswärme ausgekoppelt wird. Das abgekühlte Wasser des Primärkreislaufs wird über die zweite Bohrung wieder in den Aquifer geleitet.

### 3.3 Hydrogeothermische Systeme

Die Nutzung geothermischer Energie zeichnet sich durch geringe Betriebskosten, aber hohe Investitionskosten vor allem wegen der Bohrungen aus. Da bei der hydrogeothermischen Nutzung nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Bohrungen nicht den gewünschten Erfolg bringen, versuchen Investoren und Projektentwickler das Fündigkeitsrisiko abzuschätzen und gegebenenfalls zu versichern. Das Fündigkeitsrisiko ist das Risiko, ein geothermisches Reservoir mit einer (oder mehreren) Bohrung(en) in nicht ausreichender Quantität oder Qualität zu erschließen. Die Quantität wird dabei über die installierbare Leistung einer geothermischen Anlage definiert:

Die Output-Temperatur  $T_o$  ist die Austrittstemperatur, die nach der Abkühlung des geothermischen Fluids in der obertägigen Anlage (Wärmetauscher, Kraftwerk) erreicht wird; sie wird ausschließlich durch technische und/oder wirtschaftliche Bedingungen bestimmt und hat direkt nichts mit der Fündigkeit einer Bohrung zu tun. Die Input-Temperatur  $T_i$  ist die Ein-

$$P = \rho_F \cdot c_F \cdot Q \cdot (T_i - T_o)$$

mit	$P$	Leistung	[W]
	$\rho_F$	Dichte des Fluids	[kg m <sup>-3</sup> ]
	$c_F$	(isobare) spezifische Wärmekapazität	[J kg m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
	$Q$	Volumenstrom, Förderrate	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
	$T_i, T_o$	(Input- bzw. Output-) Temperatur	[K] oder [°C]

trittstemperatur, die am Bohrlochkopf zur Verfügung steht; sie entspricht im Wesentlichen der Aquifertemperatur: Wärmeverlust durch Transport zwischen Aquifer, Bohrlochkopf und Wärmanlage können vernachlässigt werden. Die entscheidenden Parameter sind die Fördermenge und die Temperatur im Aquifer. Unter Qualität versteht man im Wesentlichen die Zusammensetzung (Chemismus) des Wassers. Alle bisher bei geothermischen Bohrungen in Deutschland angetroffenen Wässer gelten hinsichtlich ihrer Zusammensetzung für geothermische Nutzung, zwar mit unterschiedlichem technischen Aufwand, als beherrschbar.

Um das Fündigkeitsrisiko zu minimieren und eine Qualitätsverbesserung bei der Projektierung hydrogeothermischer Anlagen zu gewährleisten, wurde in den letzten Jahren mit finanzieller Unterstützung des BMU ein Informationssystem aufgebaut [7]. Dieses Geothermische Informationssystem für Deutschland (GeotIS) ist seit 2009 unter der Adresse [www.geotis.de](http://www.geotis.de) im Internet verfügbar. Es werden Informationen über geologische Strukturen und physikalische Parameter bereitgestellt, die für eine hydrogeothermische Nutzung des tiefen Untergrundes relevant sind. Zusätzlich werden alle wichtigen Daten über bestehende oder sich im Bau befindliche geothermische Anlagen direkt angezeigt [8].

Das Geothermische Informationssystem ist als digitale Variante eines Geothermie-Atlases zu sehen, die weitgehend maßstabsunabhängig ist und stets in der aktualisierten „Auflage“ zur Verfügung steht. Sowohl geowissenschaftliche Basisdaten als auch aktuelle Erkenntnisse und Ergebnisse werden bereitgestellt und kontinuierlich ergänzt. Das GeotIS beinhaltet erstmals alle verfügbaren Untergrundtemperaturen und alle geohydraulischen Daten der geothermisch relevanten tiefen Grundwasserleiter in Deutschland. Weitere Aussagen über vorhandene Tiefbohrungen oder seismische Sektionen sowie zur hydraulischen Ergiebigkeit können interaktiv abgerufen werden. Umfangreiche mathematische Modellierungen der geologischen Strukturen und des Temperaturfeldes liefern dreidimensionale Untergrundraster. Anhand von räumlichen Horizontal- und Vertikalschnitt-

ten können Interessenten eine erste Bewertung der Chancen zur Nutzung tiefer geothermischer Energie gewinnen. Das System liefert Grundlagen für notwendige Machbarkeitsstudien, die einer Investitionsentscheidung vorausgehen.

### 3.4 Petrothermale Systeme

Bei petrothermalen Systemen erfolgt die Gewinnung der geothermischen Energie aus dem tieferen Untergrund unabhängig von Wasser führenden Horizonten. Im Wesentlichen wird die im heißen, gering durchlässigen Gestein (hot dry rock – HDR) gespeicherte Energie genutzt. Neben dem klassischen Begriff Hot Dry Rock werden auch die Begriffe *Deep Heat Mining*, *Hot Wet Rock*, *Hot Fractured Rock* oder *Stimulated Geothermal System* verwendet. Der umfassende Begriff ist *Enhanced Geothermal Systems* (EGS), der aber auch stimulierte hydrothermale Systeme beinhaltet. Das klassische HDR-Verfahren hat meistens das kristalline Grundgebirge mit Temperaturen im Bereich von 150–200 °C sowie Tiefen von mehr als 3.000 m zum Ziel. Inwieweit dichte Sedimentgesteine mit der HDR-Technik genutzt werden können, ist Gegenstand der Forschung und von Pilotprojekten.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist das kristalline Grundgebirge der oberen Erdkruste geklüftet. Die Klüfte sind z.T. geöffnet, mit hoch mineralisiertem Wasser gefüllt und miteinander durch ein Kluftnetz verbunden, so dass grundsätzlich eine Wasserzirkulation möglich ist. Das kristalline Grundgebirge verhält sich also wie ein Aquifer mit (sehr) geringen Durchlässigkeiten. Nach Abteufen einer Bohrung wird durch das Einpressen von Wasser das natürlich vorhandene Kluftsystem geweitet oder neue Klüfte (fracs) geschaffen. Die natürliche Permeabilität wird erhöht und zusätzliche und bessere Wasserwegsamkeiten werden geschaffen; das Gebirge wird sozusagen „stimuliert“ (Stimulation). Um die notwendigen Durchflussraten (in der Größenordnung von 50-100 l/s) dauerhaft zu erzielen, muss das Riss-System eine Mindestgröße für die Wärmeaustauschfläche aufweisen. Mit der zweiten Bohrung muss der stimulierte Bereich durchteuft werden. Durch diesen „Wärmetauscher“ oder „Durchlauferhitzer“ schickt man Oberflächenwasser über Injektions- und Förderbohrungen, um die Gebirgswärme aufzunehmen. Bei diesem System ist somit Wasser der Wärmeträger, das Gebirge die Wärmequelle.

Das natürlich vorhandene Kluftsystem sollte relativ gleichmäßig verteilt sein, um bei den Stimulationen unter dem vorgegebenen Stressfeld eine optimale Größe für die Wärmeaustauschflächen zu erhalten. Rybach [9] fordert beispielsweise eine Mindestgröße für die Wärmeaustauschfläche

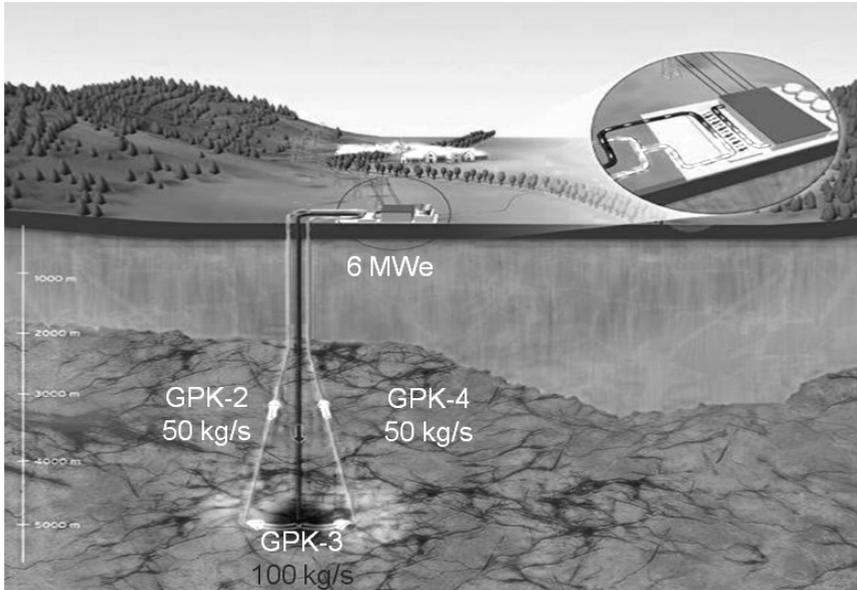


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der Untertagsituation für das Hot-Dry-Rock (HDR)-Projekt in Soultz-sous-Forêts (Elsass).

von mehr als  $2 \text{ km}^2$ . Da granitische Gesteinsverbände i.a. wesentlich rigider auf eine tektonische Beanspruchung reagieren als metamorphe Gebirge, sind sie häufig intensiver geklüftet und daher durchlässiger. Erfahrungen bei verschiedenen Bohrungen haben gezeigt, dass sich durch die Stimulation in der Regel entsprechend dem vorherrschenden Stressfeld ein steil stehendes, ellipsoidförmiges Reservoir ausbildet. Die Reservoirgröße sollte mindestens  $0,2 \text{ km}^3$  betragen [9]. Daraus ergibt sich ein untertägiger Abstand bei einem Zwei-Bohrloch-System von etwa 1000 m bei einer Länge des unverrohrten Bohrlochabschnittes von etwa 300 m.

Bei den Stimulationsmaßnahmen sollte eine ausreichend große Durchlässigkeit generiert werden. Zu hohe Durchlässigkeit birgt die Gefahr hydraulischer Kurzschlüsse und somit unzureichender Wärmeübertragung. Um dieser Gefahr vorzubeugen und um eine extreme Stimulation singulärer Klüfte zu vermeiden, empfiehlt es sich, die dafür notwendigen Injektionsversuche, falls technisch machbar, abschnittsweise (mit Einsatz von

Packern) durchzuführen. Nach derzeitigem Kenntnisstand liegt die Reichweite einer Stimulationsmaßnahme bei mehreren Hundert Metern.



Abbildung 3.8: Das weltweit erste geothermische Kraftwerk, das nach dem HDR-Prinzip (siehe Abbildung 3.7) betrieben wird, in Soultz-sous-Forêts (Elsass).

Durch die Stimulationstätigkeiten werden mikroseismische Ereignisse ausgelöst. Insbesondere in Gebieten mit natürlicher Seismizität besteht die Möglichkeit, dass die entstehenden Erschütterungen die Wahrnehmbarkeitsschwelle an der Erdoberfläche überschreiten. Das Auftreten von induzierter Seismizität hängt von der Beschaffenheit des geologischen Untergrundes, den tektonischen Spannungen, Injektionsdrücken bzw. Fließraten und wahrscheinlich auch von der Größe des stimulierten Riss-Systems ab [10]. Das Auftreten von induzierter Seismizität wird aber bis zu einem gewissen Grade als beurteilbar, prognosefähig und zum Teil als beeinflussbar angesehen. Schlüssel hierzu sind laufende Messungen und Kontrolle des Injektionsdrucks und ein seismologisches Monitoring in der Umgebung der Anlage. Gegebenenfalls sind die Injektionsdrücke bzw. Injektionsmengen zu reduzieren.

Die weltweit erste Stromproduktionsanlage, die nach dem HDR-Prinzip arbeitet, nahm im Sommer 2008 in Soultz-sous-Forêts (Elsass) ihren Probetrieb auf (Abbildungen 3.7, 3.8). Langzeiterfahrungen liegen noch nicht vor.

### 3.5 Ausblick

Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie ist Stand der Technik. Hier gilt es insbesondere das Qualitätsmanagement zu verbessern.

Während sich in Deutschland für die geothermische Nutzung der tiefen Aquifere, nicht zuletzt aufgrund des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG), eine Wirtschaftsbranche entwickelt, sind in anderen Bereichen der tiefen Geothermie noch weitere FuE-Maßnahmen notwendig. Bei der Nutzung von Störungszonen fehlen noch gesicherte Angaben über die Größenordnung der hydraulischen Kennwerte. Die Nutzung der überwiegend im Gestein gespeicherten Energie (petrothermale Systeme) mittels der HDR- bzw. EGS-Technik, befindet sich noch in der Phase der Demonstrationsanlagen.

Die Erschließung geothermischer Energie hat großes Potential, einen wesentlichen Beitrag zum Grundlastbedarf an Wärme und Strom liefern zu können. Die TAB-Studie zeigt, dass bis 2030 Geothermiekraftwerke mit einer Gesamtleistung von 1.000 MW für die geothermische Stromerzeugung in Deutschland installiert werden können [6]. Die Umsetzung eines solchen Programms erfordert jedoch erhebliche Anstrengungen im Forschungs- und Entwicklungsbereich. Schwerpunkte sollten insbesondere auf folgende Bereiche gelegt werden:

- Erkundung von geothermischen Reservoirien, Geometrie, Spannungsverhältnisse, Existenz und Lage von Störungsstrukturen.
- Wirtschaftliche und bohrtechnische Erschließung von Tiefen zwischen 3.000 und 5.000 m für Reservoirie mit normalen geothermischen Gradienten. Dies beinhaltet insbesondere die Erhöhung der Bohrproduktivität, (gerichtetes) Bohren bei großen Durchmessern, bei hohen Temperaturen und in Hartgestein sowie Gewährleistung der Langzeitintegrität der Bohrungen.
- Herstellung und Aufrechterhaltung des Thermalfluidkreislaufes sowie Entwicklung von Monitoringmethoden für die Quantifizierung von hydraulischen (z.B. Skinentwicklung), chemischen (z.B. Korrosionseigenschaften) und geometrischen (z.B. Wärmetausfläche) Parametern.
- Optimierung und Monitoring des untertägigen Thermalwasserkreislaufs, einschließlich der Prognosemodellierung der Entwicklung des Reservoirs

unter Berücksichtigung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelter Prozesse.

- Energiewandlung bei niedrigen Temperaturen mit besonderer Berücksichtigung der direkten Wärmenutzung und Hybridtechniken.

## Literatur

- [1] VDI, *VDI-Richtlinie 4640: Blatt 1 – Thermische Nutzung des Untergrundes. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. Berlin, Juni 2010.
- [2] R. Bertani, “Geothermal Power Generation in the World, 2005–2010. Update Report. Paper 0008,” in *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, p. 41, Bali, Indonesien, 25.-29. April 2010.
- [3] J. W. Lund, D. Freeston, and T. L. Boyd, “Direct Utilization of Geothermal Energy. 2010 Worldwide Review. Paper 0007,” in *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, vol. 0007, p. 23, Bali, Indonesien, 25.-29. April 2010.
- [4] I. Stober, T. Fritzer, K. Obst, and R. Schulz, *Tiefe Geothermie – Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland*. Bonn: BMU, 2. akt. Auflage 2010.
- [5] R. Jung, S. Röhling, N. Ochmann, S. Rogge, R. Schellschmidt, R. Schulz, and T. Thielemann, “Geothermische Potenziale zur Stromerzeugung. Ressourcen in Deutschland,” in *20 Jahre Tiefe Geothermie in Deutschland. 7. Geothermische Fachtagung, 6.-8.11.2002, Waren (Müritz). Tagungsband* (GtV, ed.), 20 Jahre Tiefe Geothermie in Deutschland, pp. 29–47, Meppen: Geothermische Vereinigung (GtV), 2002.
- [6] H. Paschen, D. Oertel, and R. Grünwald, *Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland. Sachstandsbericht, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)*. Berlin: TAB, 2003.
- [7] R. Schulz, T. Agemar, A. Alten, K. Kühne, A. Maul, S. Pester, and W. Wirth, “Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland,” *Erdöl Erdgas Kohle*, vol. 123, no. 2, p. 76–81, 2007.
- [8] S. Pester, R. Schellschmidt, and R. Schulz, “Verzeichnis geothermischer Standorte – Geothermische Anlagen in Deutschland auf einen Blick,” *Geothermische Energie*, vol. 56/57, pp. 4–8, 2007.

- [9] L. Rybach, “EGS. The State of the Art,” in *Tagungsband der 15. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie. Stimulierte Geothermische Systeme*, 2004.
- [10] S. Baisch, R. Vörös, E. Rothert, H. Stang, R. Jung, and R. Schellschmidt, “A Numerical Model for Fluid Injection Induced Seismicity at Soultz–Sous–Forêts,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 47, p. 405–413, 2010.

### Internet-Links

<a href="http://www.geotis.de">www.geotis.de</a>	Geothermisches Informationssystem
<a href="http://www.geothermie.de">www.geothermie.de</a>	Bundesverband Geothermie Geothermische Vereinigung (GtV)
<a href="http://www.geothermie.ch">www.geothermie.ch</a>	Schweizerische Vereinigung für Geothermie (SVG)



## Kapitel 4

### Forschung zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle

*Tilmann Rothfuchs, Thomas Brassler, Horst-Jürgen Herbert, Jörg Mönig, Ingo Müller-Lyda*

#### 4.1 Einleitung

Bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie fallen radioaktive Abfälle an, die geordnet beseitigt werden müssen. Volumen und Aktivität der radioaktiven Abfälle aus anderen Bereichen, wie der Forschung oder der Medizin, sind im Vergleich zu denen aus der Stromproduktion wesentlich geringer.

In Deutschland sind alle radioaktiven Abfälle durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen zu entsorgen. Dies steht im Einklang mit der internationalen Auffassung [1], dass diese Entsorgungsoption, insbesondere für hochradioaktive Abfälle, am besten geeignet ist. Ziel der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist die langfristige Isolation der radioaktiven Abfälle von der belebten Umwelt.

Nach dem Atomgesetz ist die Endlagerung eine Aufgabe des Bundes. Im Hinblick auf die Endlagerung werden die radioaktiven Abfälle in Deutschland in zwei Kategorien unterteilt, nämlich

- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und
- wärmeentwickelnde Abfälle.

Für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird seit 2007 aufgrund der rechtskräftig gewordenen Planfeststellung des Endlagers Konrad nunmehr die Einrichtung des Endlagers vorbereitet und voraussichtlich ab 2019 mit der Endlagerung mit einem Gesamtvolumen von ca. 300.000 m<sup>3</sup> begonnen.

Für die wärmeentwickelnden Abfälle mit einem Gesamtvolumen von ca. 22.000 m<sup>3</sup> ist dagegen ein geeignetes Endlager noch zu errichten. Die Anforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle werden durch die charakteristischen Abfalleigenschaften wie Wärmeentwicklung und hohe Aktivität bestimmt. Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten

einen Anteil von 99,9 % der Gesamtaktivität aller in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle.

Als mögliches Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle stehen in Deutschland Steinsalzformationen in steiler Lagerung (Salzstöcke) im Fokus; eine weitere in der Fachwelt diskutierte Möglichkeit ist die Endlagerung in einer Tonsteinformation.

Forschung und Entwicklung sind zur Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Endlagerung und zur Führung des Sicherheitsnachweises erforderlich. Die Zuständigkeit für die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet liegt beim Bund. Der in Deutschland erreichte Stand von Forschung und Entwicklung für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist in [2] ausführlich dargestellt.

## 4.2 Sicherheitskonzept

Auf der Grundlage der in den Jahren 2000 bis 2003 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) erarbeiteten Empfehlungen [3] soll die Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre durch ihren sicheren Einschluss in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) in tiefen geologischen Formationen erfolgen. Der ewG ist der Teil des geologischen Gesamtsystems an einem Standort, der im Zusammenwirken mit geotechnischen Verschlüssen bzw. Barrieren die Isolation der Abfälle sicherstellen muss.

Der Endlagerstandort muss eine günstige geologische Gesamtsituation aufweisen, so dass die Sicherheitsanforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch der Nachbetriebsphase über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren erfüllt werden.

Bei der Auswahl des Wirtsgesteins werden folgende Bedingungen, Forderungen und Prioritäten angelegt [3]:

- Es muss in Deutschland mit den nötigen Mächtigkeiten, mit der erforderlichen Dichtigkeit und in günstigen Tiefen vorhanden sein.
- Ausreichend große Wirtsgesteinsbereiche (Mächtigkeit, Fläche) müssen mit vertretbarem Erkundungsaufwand auffindbar oder aus anderen Untersuchungszusammenhängen bekannt sein.
- Priorität haben solche Wirtsgesteine, deren Gesteinseigenschaften bereits für sich alleine genommen geeignet sind, die radioaktiven Stoffe einzuschließen.

Die Anforderung an einen Endlagerstandort nach einer „günstigen geologischen Gesamtsituation“ ist darüber hinaus u.a. durch folgende Punkte gekennzeichnet [3]:

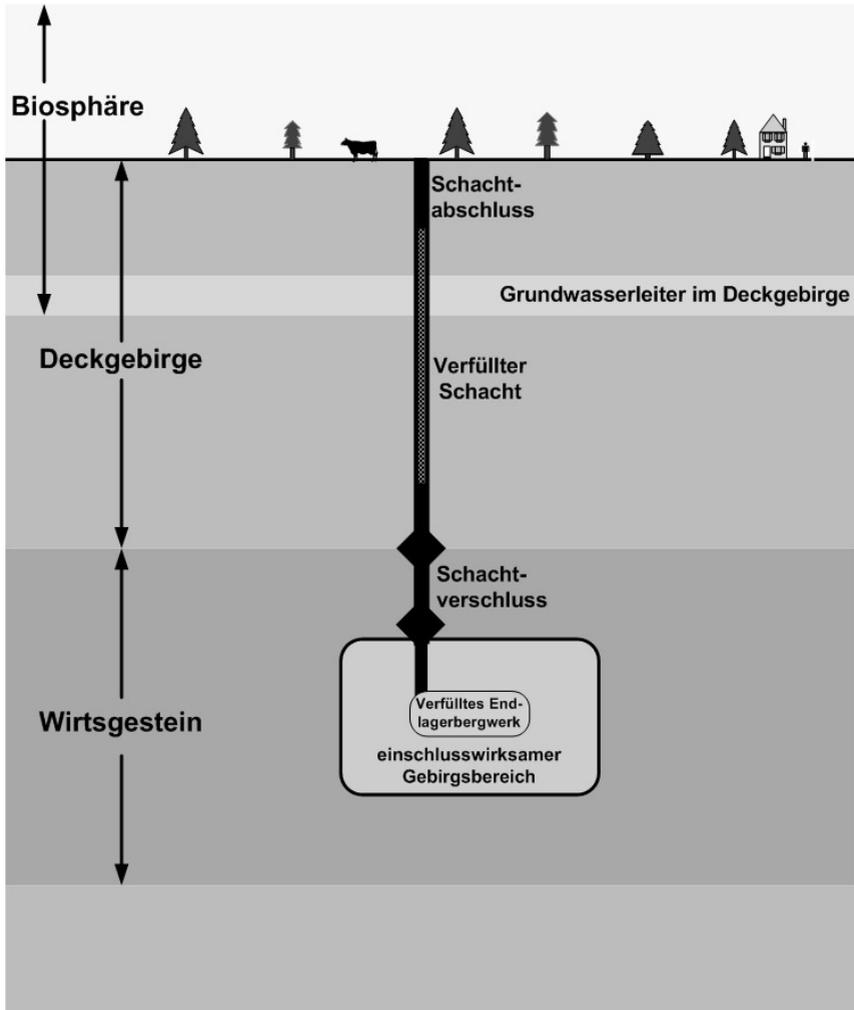


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Komponenten eines Endlagersystems in der Nachbetriebsphase [2]

- Einfacher geologisch-tektonischer Bau,
- Gute räumliche Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit,
- Fehlen tief reichender Grundwasserleiter,
- Vorkommen gering durchlässiger Gesteine mit guter Temperaturverträglichkeit,
- günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Endlagerformation.

Im Einzelfall ist jeweils eine Abwägung der verschiedenen allgemeinen Anforderungen anhand von geeigneten Kriterien durchzuführen. Abbildung 4.1 zeigt schematisch die wesentlichen Komponenten eines Endlagersystems für den langzeitsicheren, nachsorgefreien Einschluss radioaktiver Abfälle.

Die nachsorgefreie Isolation der Schadstoffe soll in der Nachbetriebsphase langfristig ausschließlich vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich, d.h. der geologischen Barriere, gewährleistet werden. Diese Barriere wird durch die verfüllten Hohlräume und Schachtverbindungen des Endlagerbergwerks zur Oberfläche gestört. Diese Störungen der natürlichen Barriere müssen durch technische Barrieren (z.B. Abfallbehälter) und geotechnische Barrieren (z.B. Schachtverschluss) für einen Übergangszeitraum bis zum Wiedererreichen der Dichtheit des Wirtsgesteins kompensiert werden.

### 4.3 Geeignete geologische Formationen in Deutschland

Das Konzept einer Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen wurde bereits im Jahr 1957 in einem von der US-National Academy of Sciences erstellten Bericht als besonders geeignet bezeichnet. In Deutschland wurde 1963 im Zweiten Deutschen Atomprogramm ebenso eine Empfehlung für Salz als Endlagermedium ausgesprochen wie in einem Gutachten der Bundesanstalt für Bodenforschung in Hannover (heute: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR).

Einen Katalog der für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Frage kommenden Salzformationen in Deutschland hat die BGR bereits 1995 veröffentlicht [5] und 2007 durch eine weitere Studie zur Bewertung von Tongesteinsformationen unter Berücksichtigung der wichtigsten Empfehlungen des AkEnd ergänzt [6] und mit [4] eine zusammenfassende Bewertung von Regionen mit potentiell geeigneten Wirtformationen vorgelegt.

In Abbildung 4.2 sind die in den Studien ermittelten Tongesteinsformationen (Grau) sowie die bereits in den 1970er bzw. 1980er Jahren diskutierten Salzformationen (schwarz) ausgewiesen.



Abbildung 4.2: Teilgebiete mit untersuchungswürdigen geologischen Wirtgesteinsformationen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland [4]

## 4.4 Endlagerstandorte in Deutschland

In Deutschland sind gegenwärtig (neben der Schachanlage Asse II) drei Standorte in der öffentlichen Diskussion über die Endlagerung radioaktiver Abfälle: Das Erkundungsbergwerk Gorleben, die Schachanlage Konrad und das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Die nachfolgenden Ausführungen basieren ganz wesentlich auf den Darstellungen dieser Standorte seitens der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) [7, 8, 9] sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [10, 11, 12].

### 4.4.1 Gorleben

Der Salzstock Gorleben wird seit 1979 auf seine Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle untersucht. Der Salzstock erstreckt sich über eine Länge von rund 14 km und ist ca. 4 km breit. Der Top des Salzstocks (Salzspiegel) liegt ca. 250 m unter der Geländeoberfläche, die Salzbasis zwischen 3.200 m und 3.400 m Teufe. Über einen Zeitraum von über 20 Jahren wurden am Standort Gorleben umfangreiche Untersuchungen zur Erkundung des internen Aufbaus des Salzstocks und seines Deckgebirges durchgeführt.

1983 gab die Bundesregierung ihre Zustimmung zur untertägigen Erkundung des Salzstocks. Im Jahr 2000 wurde in einem zwischen der Bundesregierung und den EVU vereinbarten Moratorium eine Unterbrechung der Erkundung des Salzstocks Gorleben für mindestens drei, höchstens jedoch zehn Jahre vereinbart, um die Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragestellungen zu ermöglichen. Die Erkundungsarbeiten wurden daraufhin zum 1. Oktober 2000 eingestellt [13].

Das Moratorium zur Erkundung des Salzstocks Gorleben wurde 2010 durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aufgehoben. In einem mehrstufigen Verfahren soll nun auf der Basis einer Sicherheitsanalyse, eines aktualisierten Endlagerungskonzepts und eines Gutachtens unabhängiger internationaler Wissenschaftler geprüft werden, ob der Standort Gorleben für ein Endlager in Frage kommt. Sollte diese Prüfung positiv ausfallen, soll ein atomrechtliches Planfeststellungsverfahren durchgeführt werden [14].

### 4.4.2 Morsleben

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist aus dem Bergwerk der ehemaligen Burbach-Kali AG mit den beiden Schächten Bartens-

leben und Marie hervorgegangen. Die Salzstruktur im Oberen Allertal erstreckt sich über eine Länge von etwa 50 km und durchschnittlich 2 km Breite.

Die Einlagerung radioaktiver Abfälle erfolgte zwischen 1971 und 1998. Im gesamten Einlagerungszeitraum wurden im ERAM insgesamt ca. 36.753 m<sup>3</sup> schwach- und mittelradioaktive Abfälle und 6.621 umschlossene Strahlenquellen eingelagert [15]. Die endgelagerte Abfallmenge besitzt eine Gesamtaktivität von  $3,8 \times 10^{14}$  Bq (Beta- und Gammastrahler) sowie  $2,3 \times 10^{11}$  Bq (Alpha-Strahler) [9].

Seit dem Ende der Einlagerung werden Arbeiten zur Aufrechterhaltung der Standsicherheit des Endlagers durchgeführt. Im Januar 2009 überreichte das BfS die für die Planfeststellung nach § 9b des Atomgesetzes mit der zugehörigen Öffentlichkeitsbeteiligung notwendigen Unterlagen für die Stilllegung (Planunterlagen) dem Umweltministerium des Landes Sachsen-Anhalt als zuständiger Genehmigungsbehörde. Erst nach einem positiven Planfeststellungsbeschluss der Genehmigungsbehörde kann mit der Stilllegung des ERAM begonnen werden. Für die Stilllegungsarbeiten wird eine Dauer zwischen 15 und 20 Jahren veranschlagt [16].

#### 4.4.3 Konrad

Neben Salzformationen sind auch Endlager in anderen Formationen denkbar, wenn die Sicherheitsanforderungen erfüllt werden. Hierzu gehört z.B. in Deutschland das Endlager Konrad für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in einer Eisenerzformation mit einer mächtigen Tonsteinüberdeckung.

Aufgrund der wasserundurchlässigen Tone im Hangenden ist die Grube Konrad sehr trocken. Nach der wirtschaftlich bedingten Einstellung der Eisenerzförderung im Jahr 1976 wurde aufgrund dieser günstigen geologischen Verhältnisse ein umfangreiches geowissenschaftliches Erkundungs- und Untersuchungsprogramm hinsichtlich der Eignung des Bergwerks bzw. der Eisenerzformation als Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durchgeführt [17].

Nach einem mehrjährigen Planfeststellungsverfahren liegt seit 2007 für die Schachanlage Konrad ein rechtskräftiger und unanfechtbarer Planfeststellungsbeschluss vor. Nach einer zweijährigen Vorbereitungsphase und einem Umbau der Schachanlage zu einem Endlager in weiteren vier Jahren wird mit der Einlagerung radioaktiver Abfälle voraussichtlich im Jahr 2019 begonnen.

## 4.5 Endlagerforschung in Deutschland

### 4.5.1 Forschungsbergwerk Asse

Nach der frühzeitigen Festlegung auf Steinsalz als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarb am 12. März 1965 die damalige Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) (heute: Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, HMGU) im Auftrag des Bundes das Salzbergwerk Asse und am 1. Juni 1965 wurde das Institut für Tief Lagerung (IfT) zur Durchführung von Forschungen auf dem Gebiet der Tief Lagerung radioaktiver Abfälle, insbesondere zur Eignung von Steinsalz als Wirtsgestein und zur Erprobung von Einlagerungstechniken gegründet. Zuvor war die Salzgewinnung, die 1909 mit dem Abbau von Carnallitit begonnen worden war, im Jahre 1964 eingestellt worden.

Im Rahmen dieser FuE-Arbeiten, die vorrangig der Entwicklung von Handhabungstechniken und Einlagerungsmethoden gewidmet waren, wurden zwischen dem 4. April 1967 und dem 31. Dezember 1978 insgesamt 124.494 Abfallbehälter mit schwachradioaktiven Abfällen sowie 1.293 Fässer mit mittelradioaktiven Abfällen eingelagert. Die rechtlichen Grundlagen für die Einlagerung bildeten das Atomgesetz (AtG) [18] und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV – „Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen“ [19]). Die befristeten Genehmigungen für die Versuchseinlagerung radioaktiver Abfälle liefen 1977/78 aus. Eine Rückholung der Abfälle war nicht vorgesehen.

Die FuE-Arbeiten konzentrierten sich in den Folgejahren auf Fragen der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Im Mittelpunkt dieser Arbeiten standen die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Abfällen und Wirtsgestein unter Einfluss von Wärme und Strahlung sowie die Entwicklung von Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusstechniken. Da die Schachtanlage Asse nie als Endlager für hochradioaktive Abfälle vorgesehen war, hatten die Forschungsarbeiten ausschließlich generischen Charakter unter endlagerrelevanten Randbedingungen.

Im Frühjahr 1992 entschied der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT), die FuE-Arbeiten in der Schachtanlage Asse nicht weiter zu fördern. Daraufhin wurde das GSF-Institut für Tief Lagerung 1995 aufgelöst, wobei das Bergwerk Asse zunächst in der Zuständigkeit der GSF verblieb. Nach der Beendigung der meisten Großversuche wurde das Bergwerk seit Mitte der 1990er Jahre für seine Schließung nach Bundesberggesetz [20] vorbereitet.

Der hohe Durchbauungsgrad infolge des Salzabbaus hat in den nicht verfüllten Grubenbauen und im benachbarten Deckgebirge im Lauf der Zeit zu größeren Verformungen mit Klufthildungen und ab 1988 schließlich auch zu einem Zutritt von Grundwasser in das Grubengebäude geführt. Die Bundesregierung hat daraufhin 2008 festgestellt, dass die Asse wegen der eingelagerten Abfälle und des damit verbundenen Gefahrenpotenzials verfahrensrechtlich nicht nach Bergrecht, sondern nach dem AtG wie ein Endlager zu behandeln ist. In der Folge hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), das für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständig ist, die Betreiberschaft der Anlage zum 1. Januar 2009 vom Helmholtz Zentrum München übernommen [21].

Mit Blick auf die schnelle und langzeitsichere Schließung der Asse hat das BfS die drei Optionen Vollverfüllung, Umlagerung und Rückholung untersucht und nach einem vorab in der Öffentlichkeit vorgestellten Verfahren miteinander verglichen. Obwohl die Vollverfüllung in vier Beurteilungsfeldern den Rang 1 einnahm, hat das BfS wegen erheblicher Zweifel an der Nachweisbarkeit der Langzeitsicherheit dieser Option die Option „Rückholung aller Abfälle“ als zu bevorzugende Stilllegungsoption eingestuft. Aber auch bei der Rückholung gibt es noch offene Punkte, die die Realisierbarkeit schwieriger als geplant gestalten können [22].

#### 4.5.2 Aktuelle Forschungsschwerpunkte

Die Förderung der anwendungsbezogenen Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist Aufgabe des Bundes und erfolgt aktuell auf der Grundlage des „Förderkonzepts 2007–2010“ [23] des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) mit Steuerung durch den Projektträger Karlsruhe-Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE).

Eingebunden in die heutige Endlagerforschung (Abbildung 4.3) sind Sachverständigenorganisationen wie die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesinstitutionen wie die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), nationale Forschungszentren wie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Forschungszentrum Dresden (FZD), das Forschungszentrum Jülich (FZJ), Industrieunternehmen wie die Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) bzw. deren Tochterunternehmen DBE Technology GmbH sowie Universitäten und Ingenieurbüros.

Das aktuelle Förderkonzept berücksichtigt in seiner Ausrichtung die Ergebnisse der langjährigen nationalen und internationalen, vorrangig

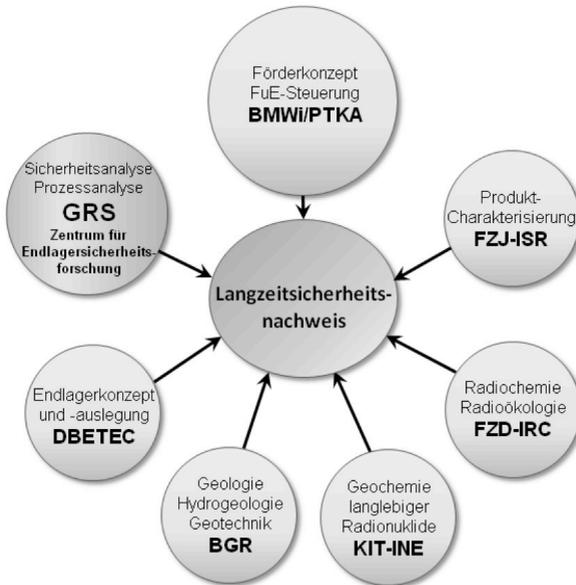


Abbildung 4.3: Beteiligte der Endlagerforschung in Deutschland

durch die Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG) geförderten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie die institutionell finanzierten FuE-Aktivitäten der nationalen Forschungszentren.

Aktuell stehen insbesondere die Weiterentwicklung bzw. Anpassung sicherheitsanalytischer Methoden und Instrumente an den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik sowie die Verbesserung des Verständnisses der in Endlagersystemen ablaufenden Prozesse im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Ein wesentliches Element hierbei ist die Weiterentwicklung von Modellen, die eine vertiefte Untersuchung der komplexen Wechselwirkungen zwischen thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozessen in einem potenziellen Endlager erlauben.

Ergänzend dazu werden Computer-Codes entwickelt, mit denen diese Prozessabläufe sowohl für den interessierten Laien als auch den forschenden Wissenschaftler visualisiert und damit besser verständlich gemacht werden können.

### 4.5.3 Langzeitsicherheitsanalyse

Zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers werden spezielle numerische Codes entwickelt, mit denen es möglich ist, die komplexen gekoppelten Prozesse im Endlagersystem (vgl. Prozessanalyse unten) in einer integrierten Analyse adäquat zu berücksichtigen. Die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises wird dabei durch die regulatorischen Anforderungen bestimmt und erfolgt unter Berücksichtigung des internationalen Vorgehens.

Die sicherheitsanalytischen Rechenmodule des integrierten Programmsystems EMOS zur Bewertung von Endlagern in verschiedenen Wirtsgesteinen (Abbildung 4.4) wurden in den zurückliegenden Jahren maßgeblich von der GRS entwickelt. Für Konzepte zur Endlagerung im Salz sind die Module hinsichtlich der berücksichtigten Prozesse bereits recht umfassend und ausgereift, wogegen zu den Tonformationen noch Erweiterungen unter Berücksichtigung einer Reihe von Einzelprozessen in der Bearbeitung sind.

Die Ergebnisse sicherheitsanalytischer Modellrechnungen werden in der Regel als Graphen dargestellt, in denen die potenzielle jährliche Strahlenexposition in der Biosphäre über der Zeit nuklidspezifisch sowie als Summenkurve aufgetragen ist (Abbildung 4.5). Endlager müssen dabei die aktuellen gesetzlichen Grenzwerte gem. AtG (aktuell  $3 \times 10^{-4}$  Sv/Jahr) immer zu allen Zeiten unterschreiten.

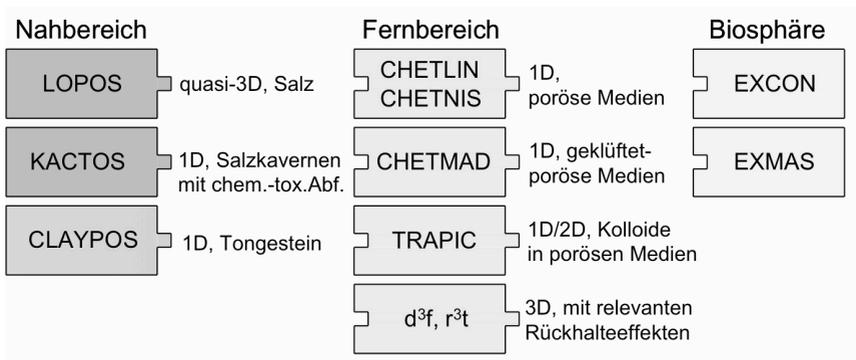


Abbildung 4.4: Module des integrierten Programmsystems EMOS [24]

Nachdem früher in der Regel Störfallsituationen analysiert wurden (vgl. Abbildung 4.5), steht bei der Sicherheitsanalyse heute der Nachweis des sicheren Einschlusses im Vordergrund. Dieses soll in der Weise ge-

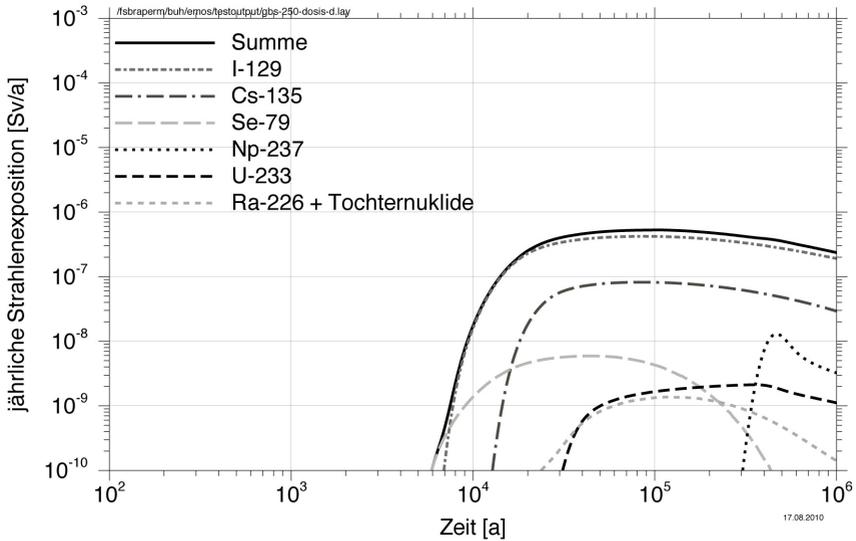


Abbildung 4.5: Strahlenexposition am Standort eines Endlagers im Salz nach einem potenziellen Lösungszutritt [25]

schehen, indem numerisch nachgewiesen wird, dass bereits am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im tiefen geologischen Untergrund eine mögliche Radionuklidfreisetzung unterhalb regulatorisch festgelegter Grenzwerte liegt [3].

Aus diesem Grunde haben in der aktuellen Endlagerforschung der Nachweis der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und der langzeitsicheren Funktion der das Endlager verschließenden geotechnischen Barrieren (vgl. Kap. 4.2) Priorität.

#### 4.5.4 Prozessanalyse

Für die hinreichende Bewertung der Funktion der Barrieren ist ein fundiertes Verständnis der im Endlager ablaufenden Prozesse und von deren Wirkungen auf die Barrieren von hoher Bedeutung. Während der Errichtung und des Betriebes des Endlagers werden Auffahrungen (Kammern, Strecken, Bohrlöcher) vorgenommen, die Abfälle eingelagert, Resthohlräume versetzt sowie Barrieren wie Damm- und Verschlussbauwerke gebaut. Die während der Bau-, Betriebs- und Stilllegungsphase initiierten thermi-

schen, hydraulischen, geomechanischen und geochemischen Prozesse sind Ausgangsbasis für die weitere Entwicklung des Endlagersystems in der Nachbetriebsphase und bestimmen im Zusammenspiel dessen langzeitliche Sicherheit.

Im Sinne des sicheren Einschlusses richten sich die aktuellen FuE-Arbeiten auf die Vertiefung des Verständnisses der komplexen Abläufe im Endlagersystem sowie die Bereitstellung der entsprechenden Werkzeuge für die prädiktive Simulation dieser Prozesse und die Bereitstellung der Forschungsergebnisse für die Weiterentwicklung der sicherheitsanalytischen Instrumente aus.

So wurde in den Jahren 2007 bis 2009, von der KEG gefördert, insbesondere die Langzeitentwicklung (*Entstehung und Rückbildung*) von Auflockerungszonen untersucht, die sich nach der Auffahrung der Hohlräume an deren Rändern ausbilden und die das Dichtvermögen nachträglich installierter Verschlussysteme signifikant beeinträchtigen können.

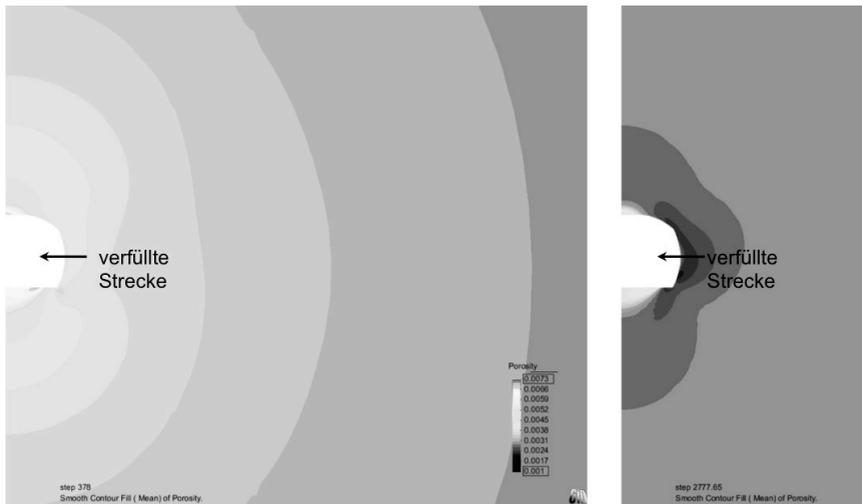


Abbildung 4.6: Rückbildung der Auflockerungszone um eine verfüllte Strecke

Abbildung 4.6 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Modellierung der Rückbildung der Auflockerungszone nach Einbringung eines Streckenverschlusses. Dargestellt ist die Porosität des umgebenden Steinsalzes (Grauwertskala 0.1 % (dunkel) – 0.73 % (hell)), links unmittelbar nach Nach-

schnitt der Streckenkontur und Einbau eines Betonverschlusses, rechts 200 Jahre später, wenn die Rückbildung weitgehend abgeschlossen ist.

Wie sich eine potentielle Schadstoffausbreitung aus dem Endlager darstellt, ist aber nicht nur eine Frage des Dichtvermögens des Wirtsgesteins und der installierten Barrieren, sondern auch der Mobilität der eingelagerten Radionuklide, die wiederum weitgehend durch chemische Prozesse bestimmt wird. Die aktuelle geochemische Endlagerforschung befasst sich vorrangig mit der Untersuchung und der modellhaften Beschreibung der Wechselwirkungen, die bei einem unterstellten Wasserzutritt im Nahfeld eines Endlagers zwischen der geologischen Barriere, den technischen Barrieren und den Abfällen zu betrachten sind.

Vorraussetzung für die richtige Beschreibung dieser Prozesse ist eine geeignete, vollständige und in sich konsistente thermodynamische Datenbasis. Eine solche Datenbasis, die auf die speziellen Bedürfnisse der Endlagerung zugeschnitten ist, wird zur Zeit in einem Verbundprojekt von GRS, KIT, FZ Dresden-Rossendorf, der TU Bergakademie Freiberg und der Schweizer Firma Colenco erarbeitet [26].

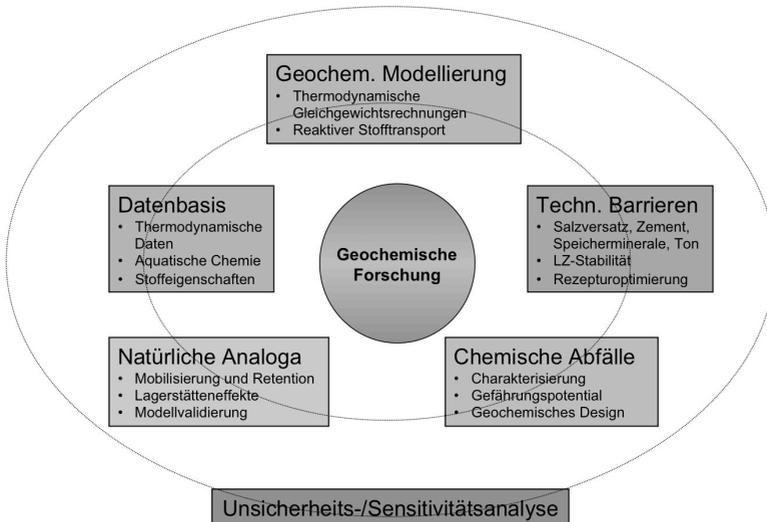


Abbildung 4.7: Schwerpunkte der geochemischen Endlagerarbeiten

Abbildung 4.7 illustriert die Schwerpunkte der heutigen geochemischen Endlagerforschung. Ganz oben steht hierbei die Entwicklung der Werkzeuge für die Modellierung der geochemischen Prozesse. Abgesichert

werden die Modellrechnungen durch Laborexperimente. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen erlauben weitere Rückschlüsse auf die Belastbarkeit von Prognoserechnungen.

#### 4.5.5 Forschung und Entwicklung in Untertagelabors

In den mit der Endlagerung befassten Ländern sind Untertagelabors (engl. Underground Research Laboratories, URL) integrale Bestandteile der jeweiligen nationalen Entsorgungsprogramme. Ziel dieser URL ist es, die zum Nachweis der sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen erforderlichen Kenntnisse durch Feldversuche in repräsentativer Umgebung abzusichern sowie Endlagertechniken zu entwickeln und ihren funktionsgerechten Einsatz zu erproben (Abbildung 4.8).



Abbildung 4.8: Erprobung eines Einlagerungssystems für hochradioaktive Abfälle [27]

Bei der Errichtung eines Endlagers in einer Salzformation kann auf langjährige Erfahrung aus dem konventionellen Gewinnungsbergbau zurückgegriffen werden. Bei der technischen Umsetzung eines Endlagerkon-

zepts müssen dagegen weitergehende Anforderungen berücksichtigt werden.

Diese umfassen die Entwicklung endlagerspezifischer Komponenten und neuer Technologien, insbesondere bei der schonenden Erstellung von Endlagerhohlräumen und der Auslegung von Verschlussbauwerken sowie spezielle Techniken zur Stilllegung. Diese Entwicklungen können in einem URL getestet und ihre Funktionsfähigkeit demonstriert werden.

Durch Feldversuche in den Untertagelabors wird das Vertrauen in die zum Nachweis der Langzeitsicherheit erforderlichen Modelle - konzeptuell und numerisch - gestärkt und deren Anwendbarkeit überprüft und demonstriert.

#### **4.6 Endlagerforschung international**

Die Verfolgung internationaler Entwicklungen ist eine der wichtigsten Rahmenbedingung für eine erfolgreiche Ausrichtung der nationalen Endlagersicherheitsforschung. Wichtige Komponenten sind hierbei die Absicherung eigener Forschungs- und Entwicklungsergebnisse durch die Mitarbeit in internationalen Gremien, wie z.B. der OECD-Nuclear Energy Agency (NEA) oder der International Atomic Energy Agency (IAEA), die auf der Grundlage internationaler Forschungsergebnisse und Erfahrungen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (z.B. [28]) entwickeln. Für die meisten Mitgliedsstaaten sind diese Regelwerke verpflichtend und finden entsprechende Berücksichtigung in der nationalen Gesetzgebung. Nationen, in denen die Endlagerprogramme noch am Anfang stehen, profitieren insbesondere von den internationalen Entwicklungen.

Die Beteiligung an internationalen Projekten und die damit verbundene Vernetzung mit international und national renommierten Forschungseinrichtungen stellen darüber hinaus sicher, dass eigene Sicherheitsanforderungen und -erkenntnisse international wahrgenommen werden und andererseits wichtige internationale Entwicklungen im eigenen Umfeld nicht übersehen werden. In Europa hat vor diesem Hintergrund die Beteiligung an internationalen Verbundprojekten der Europäischen Kommission (KEG) einen besonders hohen Stellenwert.

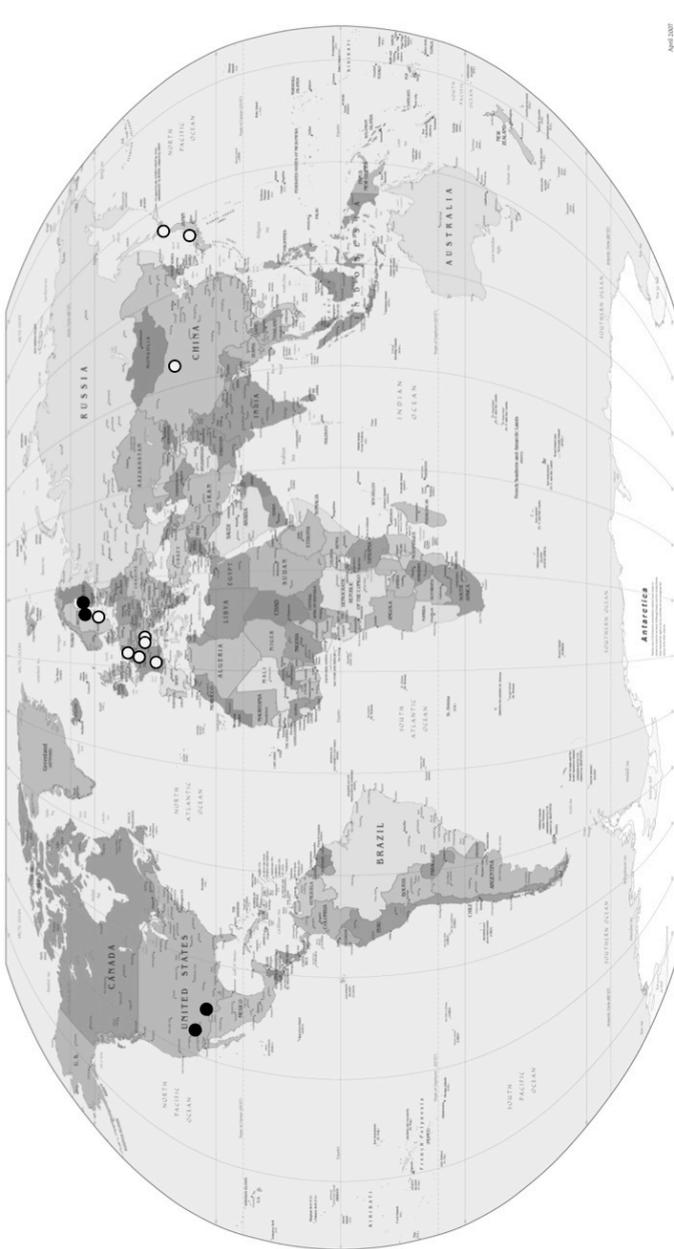


Abbildung 4.9: Die wichtigsten Endlagerprojekte (schwarze Kreise) und Untertagelabors (weiße Kreise) weltweit

Die Entwicklung und Anwendung von Methoden und Verfahren zur Führung bzw. zur Untermauerung des Langzeitsicherheitsnachweises für Endlager radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen stand in den letzten Jahren im Vordergrund des 6. und 7. Rahmenprogramms der KEG. Hierbei wurden Fragen der Verbesserung und Harmonisierung der Methoden und Werkzeuge für den Langzeitsicherheitsnachweis (Projekt PAMINA) sowie der Verbesserung des Verständnisses der im Endlager ablaufenden Prozesse zur Absicherung der in den Sicherheitsanalysen eingesetzten Modelle vorrangig behandelt (z.B. Projekte NF-Pro, FUNMIG, Theresa und ReCosy).

Hinzu kamen in jüngerer Zeit auf Wunsch der KEG insbesondere auch Projekte, die sich mit der Entwicklung, Erprobung und Demonstration der erforderlichen technischen Einrichtungen für den Betrieb und den langzeit-sicheren Verschluss von Endlagern befassten. Hier ist besonders das Integrierte Projekt ESDRED (Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs) zu nennen, in dessen Rahmen die Funktionstüchtigkeit prototypischer Einlagerungs- und Verschlussysteme demonstriert wurde.

Einige Arbeiten des Projektes ESDRED wurden in Untertagelabors in verschiedenen geologischen Formationen betrieben, z.B. im schweizerischen URL Mont Terri und im schwedischen URL Äspö. Letzteres ist ein Untertagelabor im Granit, der über die in Deutschland betrachteten Wirtsgesteine Salz und Ton hinaus international auch als geeignetes Wirtsgestein angesehen und untersucht wird.

Abbildung 4.9 zeigt eine Weltkarte mit den zur Zeit aktiven Untertagelabors und konkret verfolgten Endlagerprojekten in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen. Der Tabelle 4.1 können die jeweiligen Wirtsgesteinsformationen entnommen werden.

## 4.7 Ausblick

Nach über 40 Jahren FuE zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalzformationen in Deutschland sind die Grundlagen für den Einstieg in ein Genehmigungsverfahren für ein Endlager vorhanden. Die GRS und das Ökoinstitut haben im Auftrag des BMWi die entsprechenden Erkenntnisse in dem Bericht „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“ umfassend dargestellt [2].

Nach den im September 2010 vom BMU veröffentlichten Sicherheitsanforderungen [29] werden sich die Maßnahmen zur geologischen Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle von der Standortfestlegung des Endlagers bis zum Ende seiner Stilllegung über einen Zeitraum von

Tabelle 4.1: Übersicht aktiver Untertagelabors und Endlagerprojekte weltweit

<i>Land</i>	<i>Untertagelabor-Standort</i>	<i>Wirtsformation</i>
Frankreich	Bure	Tonstein
Frankreich	Tournemire	Tonstein
Schweiz	Mont Terri	Tonstein
Belgien	Mol	plastischer Ton
Schweiz	Grimsel	Granit
Schweden	Äspö	Granit
Finnland	Onkalo	Granit
Japan	Mitzunami	Granit
China	Beishan (in der Erkundung)	Granit
Japan	Honorobe	Sedimentgestein
<i>Endlagerprojekte</i>		
USA	WIPP (genehmigt)	Salz
Schweden	Forsmark (Genehmigungsantrag eingereicht)	Granit
Finnland	Onkalo (Standortuntersuchungen laufen)	Granit

mehreren Jahrzehnten erstrecken. Daher muss dem in diesem Zeitraum zunehmenden Kenntnisgewinn und der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik Rechnung getragen werden.

Dies bedeutet, dass im Genehmigungsverfahren die Einbindung begleitender FuE-Arbeiten (auch nach dem Planfeststellungsbeschluss) mindestens bis zum langzeitsicheren Verschluss des Endlagers zu regeln ist. Dabei stehen nachfolgende Arbeiten im Fokus:

- Ausrichtung des FuE-Bedarfs an den Erfordernissen des Langzeitsicherheitsnachweises mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Methoden und Verfahren der Sicherheitsanalyse.
- Periodische Sicherheitsbewertungen auf Grundlage der weiter entwickelten Methoden und Werkzeuge sowie jeweils der Nachweis, dass die ehemals gezogenen Schlüsse richtig waren und durch die aktuellen Erkenntnisse bestätigt werden.

Die hierfür durchzuführenden Forschungsarbeiten sind soweit wie möglich in internationale Projekte einzubetten. Diese Einbindung erhöht die Transparenz der nationalen Vorgehensweise und stellt ein unverzichtbares Element für deren wissenschaftliche Absicherung dar.

## Literatur

- [1] OECD-Nuclear Energy Agency (NEA), *Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste. A Collective Statement by the NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC). NEA No. 6433*. Paris: NEA, 2008.
- [2] T. Brasser, J. Droste, I. Müller-Lyda, J. M. Neles, M. Sailer, G. Schmidt, and M. Steinhoff, *Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Projektleitung: Dr. Ingo Müller-Lyda (GRS mbH) und Michael Sailer (Öko-Institut e.V.). Hauptband, GRS-247*. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), September 2008.
- [3] Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), “Auswahlverfahren für Endlagerstandorte.” [www.bfs.de/de/endlager/faq/langfassung\\_abschlussbericht\\_akend.pdf](http://www.bfs.de/de/endlager/faq/langfassung_abschlussbericht_akend.pdf), Dezember 2002.
- [4] BGR, *Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*. Hannover/Berlin: BGR, April 2007.

- [5] F. Kockel and P. Krull, *Endlagerung stark Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Bericht Archiv-Nr. 111089.* Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1995.
- [6] P. Hoth, H. Wirth, K. Reinhold, V. Bräuer, P. Krull, and H. Feldrappe, *Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Bericht.* April 2007.
- [7] DBE, “Erkundungsbergwerk Gorleben. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE).” <http://www.dbe.de/de/betriebe/gorleben/1/index.php>.
- [8] DBE, “Schachanlage Konrad (Salzgitter). Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE).” <http://www.dbe.de/de/betriebe/konrad/1/index.php>.
- [9] DBE, “Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE).” <http://www.dbe.de/de/betriebe/morsleben/1/index.php>.
- [10] BGR, “Erkundungsstandort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).” [http://www.bgr.bund.de/nn\\_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Gorleben/gorleben\\_\\_inhalt.html](http://www.bgr.bund.de/nn_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Gorleben/gorleben__inhalt.html).
- [11] BGR, “Schachanlage Konrad. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).” [http://www.bgr.bund.de/nn\\_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Konrad/konrad\\_\\_inhalt.html](http://www.bgr.bund.de/nn_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Konrad/konrad__inhalt.html).
- [12] BGR, “Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).” [http://www.bgr.bund.de/nn\\_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Morsleben/morsleben\\_\\_inhalt.html](http://www.bgr.bund.de/nn_329652/DE/Themen/Geotechnik/Endlagerstandorte/Morsleben/morsleben__inhalt.html).
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe.” [http://www.bfs.de/de/bfs/druck/broschueren/Endlagerung\\_national.pdf](http://www.bfs.de/de/bfs/druck/broschueren/Endlagerung_national.pdf), 2005. Elektronischer Zugang existiert nicht mehr.
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), “Pressemitteilung Nr. 037/10 (Berlin, 15.03.2010).” <http://www.bmu.de>

[www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle\\_pressemitteilungen/pm/45767.php](http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/45767.php), 2010.

- [15] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “ERAM - Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben.” [http://www.bfs.de/de/endlager/endlager\\_morsleben/morsleben\\_artikel.html](http://www.bfs.de/de/endlager/endlager_morsleben/morsleben_artikel.html).
- [16] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) - Update (Einlegeblatt zur Broschüre „Endlager Morsleben“).” <http://www.bfs.de/de/bfs/druck/broschueren/Einlegeblatt.pdf>, September 2005.
- [17] W. Brewitz (Redaktion), *Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Abschlussbericht (GSF - T 136) / Ges. für Strahlen- u. Umweltforschung mbH (GSF), Inst. für Tief Lagerung in Zusammenarbeit mit Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Inst. für Nukleare Entsorgungstechnik. (Ausgeführt im Auftr. d. Bundesministers für Forschung u. Technologie, Förderungskennzeichen KWA 1324 6)*. Neuherberg: GSF, 1982.
- [18] “Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) i. d. F. der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 26. Februar 2008 (BGBl. I S. 215).”, 2008.
- [19] “Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 Nr. 1 und 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I S. 2930).”, 2007.
- [20] “Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2833).”, 2006.
- [21] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), “Vom Salzbergwerk zum Atomlager. Die wechselvolle Geschichte der Schachtanlage Asse II.” [http://www.endlager-asse.de/cln\\_137/DE/2\\_WasIst/B\\_Geschichte/\\_node.html](http://www.endlager-asse.de/cln_137/DE/2_WasIst/B_Geschichte/_node.html), 22.03.2011.
- [22] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), “Schachtanlage Asse II.” [http://www.bmu.de/atomenergie\\_ver\\_und\\_entsorgung/endlagerung/asse/doc/40319.php](http://www.bmu.de/atomenergie_ver_und_entsorgung/endlagerung/asse/doc/40319.php), Februar 2011.

- [23] Forschungszentrum Karlsruhe, “Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007 – 2010). Förderkonzept des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe - Wassertechnologie und Entsorgung,” Dezember 2007.
- [24] R. Storck, D. Buhmann, R. P. Hirsekorn, T. Kühle, and L. Lührmann, *Das Programmpaket EMOS zur Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Version 5. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-122*. 1996.
- [25] J. Brenner, D. Buhmann, and T. Kühle, *Einfluss netzwerkartiger Strukturen der Gruben Hohlräume auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salinar. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*. 2000.
- [26] S. Gester, M. Altmaier, V. Brendler, S. Hagemann, H. Herbert, C. Marquardt, H. C. Moog, V. Neck, A. Richter, W. Voigt, and S. Wilhelm, “THEREDA – Thermodynamic Reference Database for Nuclear Waste Disposal in Germany, Proceedings der IHLRWM Konferenz, 7.-11. September 2008, Las Vegas,” 2008.
- [27] T. Rothfuchs (Redaktion), *Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine. Final report. Commission of the European Communities. Nuclear science and technology. EUR 16688 EN*. Neuberberg: GSF, 1995.
- [28] International Atomic Energy Agency (IAEA), “IAEA Safety Standards, Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements No. WS-R-4,” 2006.
- [29] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), “Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30.09.2010.” [http://www.bmu.de/atomenergie\\_ver\\_und\\_entsorgung/downloads/doc/42047.php](http://www.bmu.de/atomenergie_ver_und_entsorgung/downloads/doc/42047.php).



## Kapitel 5

# Chancen und Risiken der CO<sub>2</sub>-Speicherung

*Michael Kühn*

### 5.1 Einleitung

Im Rahmen der Klimapolitik wird die Lagerung von Kohlenstoffdioxid in tiefen Gesteinsschichten als eine potenzielle Maßnahme für die Reduktion der Treibhausgasemissionen und gegen die globale Klimaerwärmung gesehen. Mit dieser entwicklungsfähigen Technologie sind aber auch Ängste der Bevölkerung in den geplanten Zielgebieten verbunden: Ist eine langfristige und sichere Speicherung ohne Gefährdung des Menschen und der Umwelt möglich? Wissenschaft und Technik, unter besonderer Berücksichtigung der Erfahrungen vom Forschungsstandort Ketzin, helfen diese Frage zu beantworten [1].

Geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung ist neben der Einsparung von Energie, der Effizienzsteigerung sowie dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien eine wichtige Option im Portfolio der CO<sub>2</sub>-Vermeidungsstrategien [2].

Trotz des verstärkten und notwendigen Ausbaus der erneuerbaren Energien gehen viele Experten davon aus, dass Kohle auch in der Zukunft einen erheblichen Anteil am deutschen Energiemix einnehmen wird. Die Kohleverstromung ist umweltverträglich jedoch nur möglich, wenn das CO<sub>2</sub>, das beim Verbrennungsprozess entsteht, minimiert wird oder erst gar nicht in die Atmosphäre gelangt. Neben der Energiewirtschaft sind aber auch die Zement- und Stahlindustrie und die Petrochemie wesentliche Emittenten des Treibhausgases CO<sub>2</sub>. Diese hier aufgezählten großen Punktquellen sind zurzeit die einzigen Orte, die sich wirtschaftlich gesehen für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung eignen.

Die Technologie der Wahl heißt auf Englisch „Carbon Capture and Storage“ (abgekürzt CCS) und bedeutet auf Deutsch Abscheidung und geologische Speicherung von CO<sub>2</sub>. Berechnungsszenarien (Abbildung 5.1) zeigen, dass CCS mit ca. 25 % zur gesamten Emissionsreduktion beitragen könnte [3].

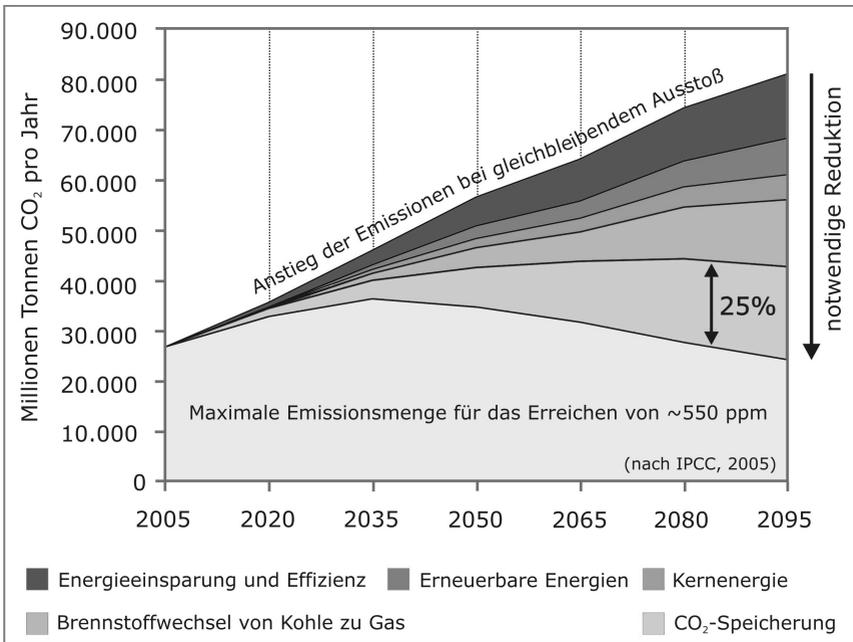


Abbildung 5.1: Berechnungen des IPCC zeigen, [3], dass geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung neben anderen Klimaschutzoptionen einen wichtigen Beitrag zur Senkung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Stabilisierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration unterhalb von 550 ppm leisten kann.

## 5.2 Geowissenschaftliche Grundlagen

### 5.2.1 Eingriff des Menschen in den Kohlenstoffkreislauf

Unter dem Kohlenstoffkreislauf versteht man Umwandlungs- und Transportprozesse kohlenstoffhaltiger Verbindungen im globalen System. Die Kenntnis dieses Kreislaufs einschließlich seiner Teilprozesse ermöglicht es unter anderem, die Eingriffe des Menschen in das Klima und damit ihre Auswirkungen auf die globale Klimaänderung abzuschätzen und angemessen zu reagieren.

Der jährliche Eintrag von fast 30 Gigatonnen-Gt (30 Milliarden Tonnen) Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre [4] entspricht einer Koh-

lenstoffmenge von ungefähr 8 Gt. Der Vergleich mit der Gesamtmenge von 800 Gt Kohlenstoff in der Atmosphäre macht deutlich, dass es sich hierbei um einen wesentlichen anthropogenen Beitrag handelt, der das natürliche Gleichgewicht beeinflusst.

### 5.2.2 Optionen der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung

Den Speichern in tiefliegenden geologischen Gesteinsschichten, die an Land, aber auch unter dem Meeresboden liegen können, werden große Speicherpotenziale eingeräumt. Um CO<sub>2</sub> in den Untergrund einzubringen und es dort langfristig und sicher zu speichern, braucht man poröse Gesteine. Die wichtigsten Speicheroptionen sind:

1. Sogenannte saline oder salinare Aquifere. Im Deutschen bezeichnet man sie als tiefe, Salzwasser führende Grundwasserleiter.
2. Fast erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, in denen mit Hilfe des eingebrachten CO<sub>2</sub> noch zusätzliche Mengen Erdgas beziehungsweise Erdöl gefördert werden können, die ansonsten in den Lagerstätten verblieben. Dies wird meist mit den englischen Ausdrücken „Enhanced Oil Recovery (EOR)“ und „Enhanced Gas Recovery (EGR)“ bezeichnet.
3. Erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten bieten Raum für die Einlagerung von CO<sub>2</sub>, nachdem Erdgas beziehungsweise Erdöl aus ihnen gewonnen wurde (Abbildung 5.2).

National und international betrachtet stellen die Salzwasser führenden Grundwasserleiter das umfangreichste Speicherpotenzial. Nur wenn die Technologie der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung in diesen Gesteinsformationen möglich sein wird, können für das Klima relevante Mengen an CO<sub>2</sub> gespeichert werden. Für die Bundesrepublik werden die Kapazitäten durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ermittelt. Nach aktuellen Schätzungen aus diesem Jahr beläuft sich die Speicherkapazität in tiefen, Salzwasser führenden Grundwasserleitern auf 6-12 Gt CO<sub>2</sub> [5] und jene in Erdgaslagerstätten auf 2,5 Gt [6]. Alle anderen Optionen spielen für die Bundesrepublik Deutschland nur eine untergeordnete Rolle. Aus weltweiter Sicht werden die Speicherpotenziale mit mindestens 2.000 Gt und optimistisch mit 11.000 Gt abgeschätzt [7].

### 5.2.3 Verhalten von CO<sub>2</sub> in den geologischen Speichern

Bei den potenziellen Speichergesteinen handelt es sich im Wesentlichen um Sandsteine, die sich dadurch auszeichnen, dass sie eine ausreichende Porosität und Permeabilität besitzen, so dass CO<sub>2</sub> gut in diese Formationen

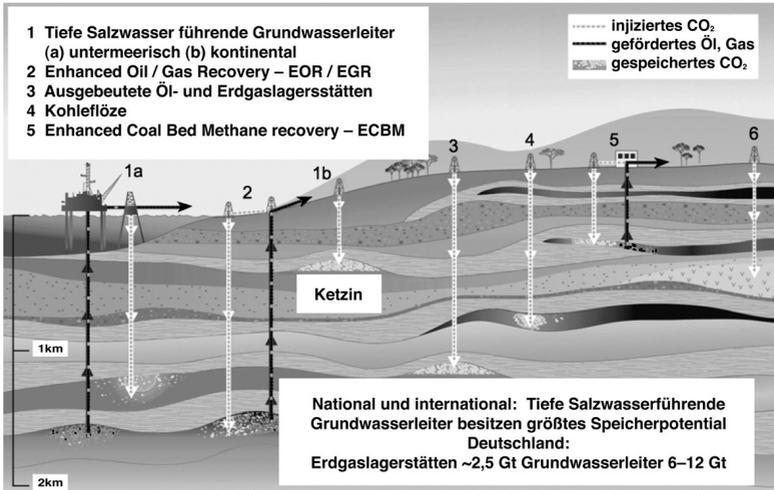


Abbildung 5.2: Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) kann potenziell in tief liegende, poröse und durchlässige Gesteinsschichten eingebracht werden, wenn sich darüber für CO<sub>2</sub> undurchlässige Schichten befinden, die das CO<sub>2</sub> daran hindern, sich in Richtung Erdoberfläche auszubreiten. Optionen sind (1) Tiefe Salzwasser führende Grundwasserleiter, (2)/(3) Erdöl- und Erdgaslagerstätten und (4)/(5) nicht abbaubare Kohleflöze. Dargestellt ist die Injektion von CO<sub>2</sub> und gegebenenfalls gefördertes Erdgas und Erdöl

eingebracht werden kann. Kohlenstoffdioxid wird über Bohrungen mit Hilfe von Pumpen in das Gestein injiziert. Dadurch wird der Druck erhöht, weil der durch das Gestein dem CO<sub>2</sub>-Strom entgegengerichtete Fließwiderstand, je nach Permeabilität des Gesteins, überwunden werden muss.

Die verschiedenen Prozesse, die nach Einbringung des CO<sub>2</sub> in das Speichergestein berücksichtigt werden müssen (Abbildung 5.3), sind auf einer logarithmischen Zeitskala von unterschiedlicher Bedeutung [3]. Auf der kürzesten Zeitskala von Jahren, während der Injektion und direkt danach, steigt das eingebrachte CO<sub>2</sub> nach oben, weil seine Dichte geringer ist als die des dort ansonsten zumeist vorhandenen Wassers. Das CO<sub>2</sub> sammelt sich dann unterhalb des undurchlässigen Deckgesteins, das meistens aus Ton- beziehungsweise Salzgestein besteht.

Auf der Zeitskala von Zehnerjahren kommt es zur Rückhaltung des CO<sub>2</sub> durch Kapillarkräfte, wenn die Porenräume so eng sind, dass das CO<sub>2</sub> trotz der Dichtedifferenz zum Umgebungswasser nicht mehr aufsteigen kann. Das Gas kann in dem Fall nur durch andere Fluide verdrängt werden, wenn diese unter erhöhtem Druck in die Speicherformation einströmen.

Im Rahmen von Hunderten von Jahren wird darüber hinaus ein wesentlicher Teil des CO<sub>2</sub> im Wasser gelöst und es bildet sich Kohlensäure. Die Bindung von CO<sub>2</sub> an das Wasser bleibt so lange stabil, wie sich der Druck auf die Lösung nicht verringert, beziehungsweise sich die Temperatur nicht erhöht. Das so mit CO<sub>2</sub> angereicherte Wasser hat zudem eine etwas höhere Dichte als das ursprüngliche Wasser und hat so die Tendenz abzusinken.

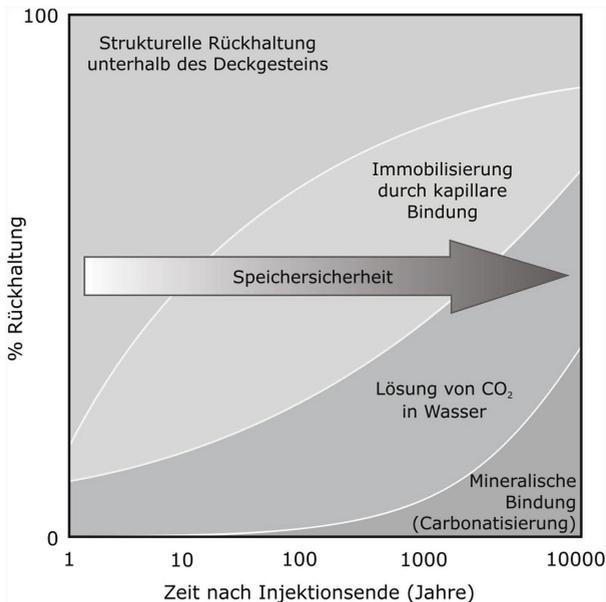


Abbildung 5.3: Vier Rückhaltemechanismen sind bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung zu berücksichtigen, die auf der zeitlichen Skala zu unterschiedlichen Zeiten eine unterschiedliche Bedeutung besitzen (verändert nach IPCC [3]).

Langfristig, in etwa auf der Zeitskala von tausend Jahren, werden Anteile des Kohlenstoffdioxids auch durch den Prozess der Carbonatisierung in Form von Mineralen, hier Carbonaten, gebunden. Die Carbonatisierung ist die chemische Umwandlung alkalischer Bestandteile des Gesteins mit der Kohlensäure in einer Neutralisierungsreaktion, die einer gewöhnlichen und allgegenwärtigen Verwitterungsreaktion entspricht. Die Mineralisierung des CO<sub>2</sub> führt in Form von Calcit zu einer festen Ablagerung im Gestein und ist dadurch dauerhaft gebunden.

Diese vier Rückhaltemechanismen sorgen in den Schichten des Speichers dafür, dass sich das CO<sub>2</sub> mit der Zeit immer stärker ans Gestein bindet und tragen so zur dauerhaften und sicheren Speicherung bei. Denn es ist nur das als freies Gas vorliegende CO<sub>2</sub>, welches eine Auftriebskraft erfährt und daher tendenziell den Speicher nach oben verlassen könnte. Dieser Anteil geht aber mit der Zeit in den Speichern sehr stark zurück (Abbildung 5.3). Diese Abschätzungen werden durch Untersuchungen an natürlichen CO<sub>2</sub>-Lagerstätten belegt. Es wird zwar nur der geringere Teil von ca. 18 % langfristig mineralisiert, aber der Großteil des CO<sub>2</sub> findet sich im Wasser gelöst und nicht als freies Gas [8].

#### 5.2.4 Sicherheit bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung

Die wichtigste Frage bezüglich der CO<sub>2</sub>-Speichertechnologie, die es zu beantworten gilt, ist die nach der Sicherheit für Mensch und Umwelt. Um die Sicherheit der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung zum jetzigen Zeitpunkt abzuschätzen, werden u.a. zwei sogenannte Analoge herangezogen. Zum einen sind dies natürliche CO<sub>2</sub>-Lagerstätten bzw. -quellen und zum anderen Standorte, an denen Gasspeicherung in porösen Gesteinen durchgeführt wird.

Die unterirdische, geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> ist keine Erfindung des Menschen, sondern ein natürliches Phänomen. Es existieren weltweit natürliche CO<sub>2</sub>-Lagerstätten seit Tausenden bis Millionen von Jahren, z.B. in Deutschland in der Rhön. Diese natürlichen Speicherstätten belegen, dass Speichergesteine CO<sub>2</sub> für geologisch lange Zeiträume aufnehmen und Deckgesteine dieses effizient zurückhalten können.

Auf der kürzeren Zeitskala liefern Erfahrungen aus der Gasspeichertechnik Erkenntnisse für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung. Die Technik zur Speicherung großer Erdgas Mengen in tiefen unterirdischen Gesteinsformationen zum Ausgleich von saisonalen Bedarfsschwankungen hat sich seit Jahrzehnten bewährt. Das Speichervolumen der über 40 Gasspeicher in Deutschland beläuft sich auf ca. 20 Milliarden Kubikmeter Erdgas [7].

Die beiden angeführten Analoge machen deutlich, dass es möglich ist, die Verfahren technisch zu beherrschen und sicher zu betreiben, aber auch, dass CO<sub>2</sub> langfristig in den Speichergesteinen verbleibt. Trotzdem muss man sich über mögliche Leckagewege und die mit der Technologie verbundenen Risiken im Klaren sein und sicher stellen, dass keine Gefahr für Mensch oder Umwelt durch die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung verursacht wird.

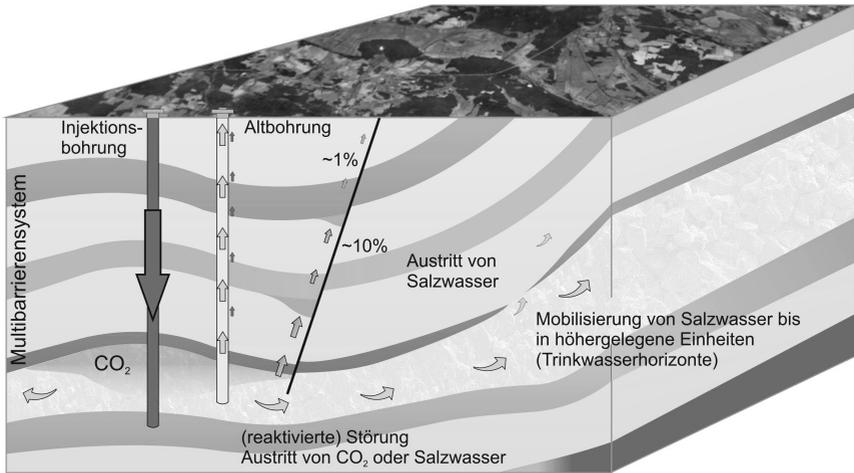


Abbildung 5.4: Schematisches Prinzip der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung mit einem Multibarrierensystem. Dargestellt sind außerdem potenzielle anthropogene und natürliche Leckagewege für das CO<sub>2</sub>. Es handelt sich dabei um aktive als auch bereits stillgelegte Bohrungen (Bohrungen stark vereinfacht dargestellt). Leckagewege natürlichen Ursprungs können gegebenenfalls entlang von Rissen und Trennflächen im Gestein existieren. Darüber hinaus ist der Prozess der gegebenenfalls auftretenden Salzwasserverlagerung abgebildet.

In Abbildung 5.4 sind die potenziellen Risiken der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung zusammengefasst dargestellt. Das CO<sub>2</sub> wird unterhalb eines undurchlässigen Deckgesteins in die Speicherformation eingebracht. Hier handelt es sich um ein sogenanntes Multibarrierensystem, in dem sich auch oberhalb des Speicherkomplexes wiederum potenzielle Speichergesteine und Deckgesteine abwechseln. Dies ist auf die geologische Entstehung

lungsgeschichte zurückzuführen. Potenzielle Leckagewege sind zum einen vorhandene Bohrungen. Sowohl aktive als gegebenenfalls auch bereits stillgelegte Bohrungen können Migrationswege sein, weil sie erstens eine direkte Verbindung zwischen der Erdoberfläche und dem Speicher darstellen und zweitens künstliche Materialien enthalten (Verrohrung und Zementierung), die langfristig korrodieren können.

Außer den Bohrungen gibt es auch potenzielle natürliche Leckagewege. Dies sind Fließpfade entlang von Rissen und Trennflächen im Gestein, die als geologische Klüfte und Störungen bezeichnet werden (Abbildung 5.4). Sie können im Speichergestein und Deckgestein sowie in den darüber befindlichen Gesteinsschichten existieren und sind komplexer als Bohrungen, weil es sich um ungleichmäßige Flächen mit variabler Permeabilität handelt. Geologische Störungen können komplett dicht gegenüber Fluiden sein, aber wie natürliche CO<sub>2</sub>-Quellen zeigen, können sie ebenfalls durchlässig sein für das Gas.

Ein weiterer Effekt, der sehr genau für jeden Standort untersucht werden muss, ist die Salzwasserverlagerung (Abbildung 5.4). Das in das Speichergestein eingebrachte CO<sub>2</sub> verdrängt das im Porenraum befindliche Salzwasser. Es muss sichergestellt werden, dass das Salzwasser nicht über Migrationspfade in die Trinkwasserreservoirs der flachen Grundwasserleiter gelangt und dort das Trinkwasser kontaminiert.

Eine generelle Bewertung von Standorten ist im Vorfeld nur sehr schwer beziehungsweise ungenau machbar. Es ist sehr wesentlich, dass eine umfangreiche Erkundung durchgeführt wird. Diese Erkundung ist standortspezifisch und der wichtigste und einzig mögliche Schritt, um eine detaillierte Abschätzung der Risiken durchzuführen und zu entscheiden, ob eine langfristige und sichere geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung durchführbar ist.

### 5.2.5 Überwachung von geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern

Alle CO<sub>2</sub>-Speicherstätten müssen aus betrieblichen, sicherheitstechnischen, umwelttechnischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Gründen überwacht werden. Eine Überwachungsstrategie muss definieren, was genau überwacht werden und wie dies erfolgen soll. Erst die Überwachung der Speicherstätte stellt sicher, dass das Hauptziel der geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub> erreicht wird: Die langfristige Isolierung des vom Menschen erzeugten CO<sub>2</sub> von der Atmosphäre.

Die EU-Richtlinie RL 2009/31/EG über CCS, die am 25. Juni 2009 in Kraft getreten ist, schreibt vor, dass das Verhalten des Speichers und

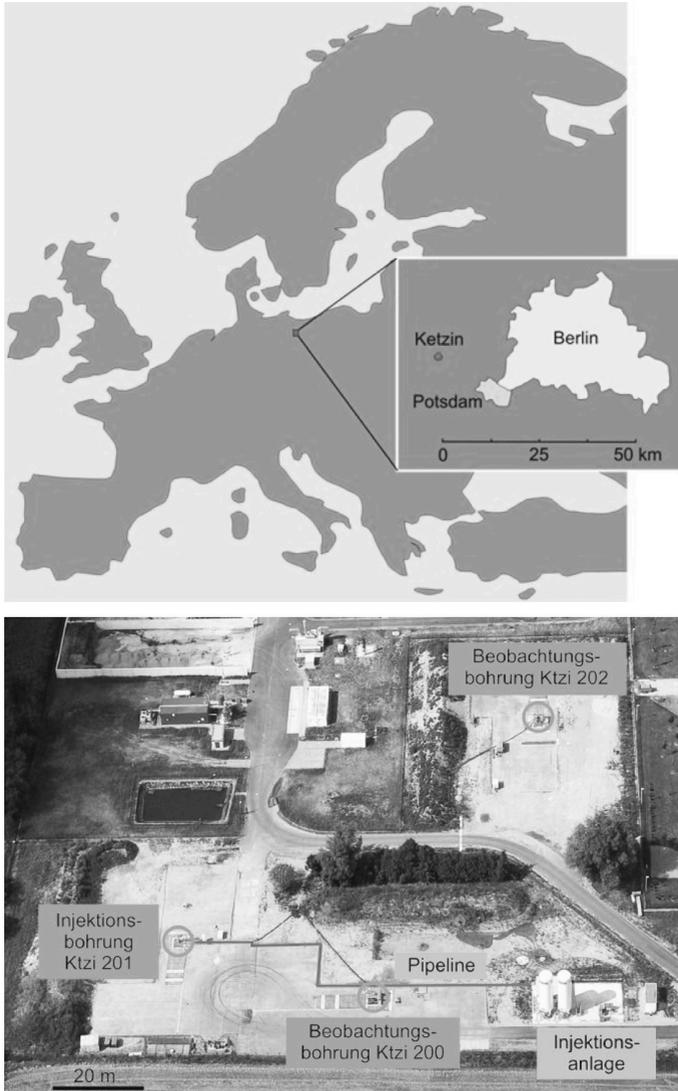


Abbildung 5.5: Pilotstandort zur geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung im Haveländischen Ketzin bei Berlin und Potsdam (oben). Luftbild des Standortes mit Injektionsanlage und Bohrungen.

auch der natürliche Gashaushalt der Umwelt überwacht werden müssen. Weiter heißt es, dass die Betreiber demonstrieren müssen, dass der Speicherbetrieb den Bestimmungen entspricht und auch in ferner Zukunft noch entsprechen wird. Die umfangreichen Überwachungsmaßnahmen sind notwendig, um Unsicherheiten beim prognostizierten Verhalten der Speicherstätte zu erkennen beziehungsweise zu reduzieren. Die Überwachungsmethoden dienen dem Sicherheitsmanagement. Wie ein Standort überwacht werden kann, wird im nächsten Abschnitt über den Forschungsstandort Ketzin deutlich.

### 5.3 Pilotstandort Ketzin

#### 5.3.1 Lokation, Infrastruktur und Aufgabenstellung

Die unterirdische, geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> wird nahe der Stadt Ketzin im Westen Berlins erforscht (Abbildung 5.5, oben). Für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung wurden im Jahr 2007 drei neue Bohrungen bis in eine Tiefe von jeweils etwa 800 m niedergebracht. Eine dieser Bohrungen (Ktzi 201) dient zur Injektion des CO<sub>2</sub>, die beiden anderen (Ktzi 200 und Ktzi 202) werden zur Beobachtung der Injektion und der CO<sub>2</sub>-Ausbreitung eingesetzt (Abbildung 5.5, unten).

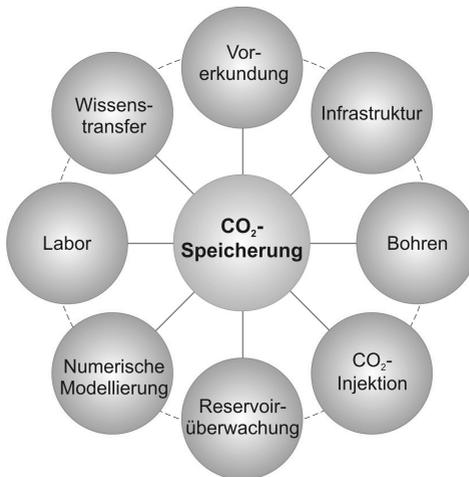


Abbildung 5.6: Ketzin umfasst alle Stadien eines Speicherstandortes.

Ketzin umfasst alle Stadien eines Speicherstandortes (Abbildung 5.6): Vorerkundung, Aufbau der Infrastruktur, Erstellen der Bohrungen, die CO<sub>2</sub>-Injektion, die Reservoirüberwachung, numerische Modellierungen, begleitende Laborarbeiten und die Öffentlichkeitsarbeit. Dabei werden standortspezifische und standortunabhängige Fragestellungen bearbeitet. Diese beinhalten geowissenschaftliche als auch ingenieurwissenschaftliche Forschung. Der Schwerpunkt der Arbeiten in Ketzin liegt auf der Reservoirüberwachung.

### 5.3.2 Geologie und Betrieb

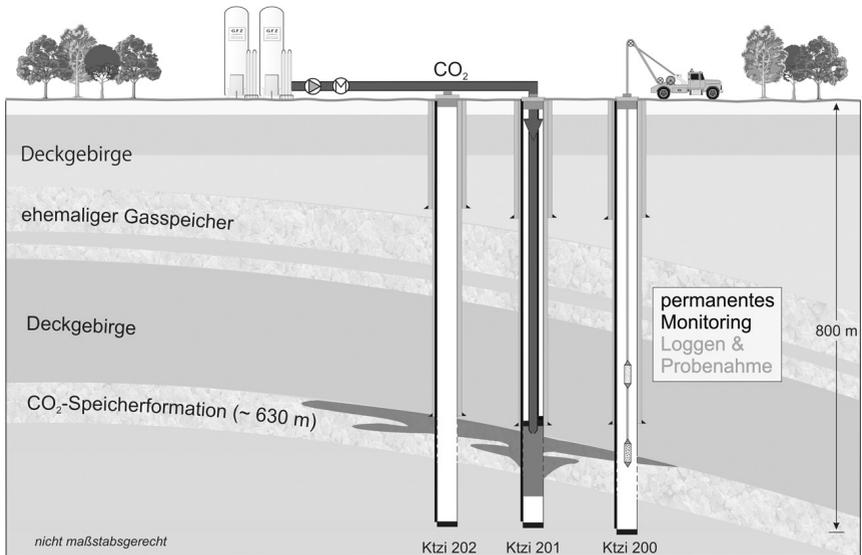


Abbildung 5.7: Schematischer Profilschnitt am Standort Ketzin mit Darstellung der Bohrungen zur Injektion des CO<sub>2</sub> (Ktzi 201) und zur Beobachtung der CO<sub>2</sub>-Ausbreitung (Ktzi 200 und Ktzi 202).

Die geologischen Zielhorizonte für die CO<sub>2</sub>-Speicherung am Standort Ketzin sind poröse Sandstein-Schichten in 630 m bis 650 m Tiefe [9]. Die Speichersandsteine werden von rund 240 m mächtigen abdichtenden Tonsteinen überlagert (Abbildung 5.7). Bis 2004 wurde am Standort Ketzin ein Untergrundspeicher für Erdgas in einer flachen Sandsteinformation in

etwa 280 m Tiefe betrieben. Daher ist der Standort gut untersucht. Seit Juni 2008 wird am Standort Ketzin lebensmittelreines CO<sub>2</sub> über die Injektionsbohrung in den Untergrund eingespeist; bis Mai 2011 insgesamt ca. 49.400 Tonnen.

### 5.3.3 Eingesetzte Überwachungsmethoden

Das wissenschaftliche Begleitprogramm ist vor allem auf die Überwachungsmethoden fokussiert [10, 11]. Es werden geophysikalische und geochemische Messungen in der Injektionsbohrung und den zwei Beobachtungsbohrungen durchgeführt. Die Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Ausbreitung erfolgt mittels seismischer und geoelektrischer Methoden von der Erdoberfläche aus. Es werden theoretische Vorhersagemodelle, mit deren Hilfe die unterirdische Ausbreitung des CO<sub>2</sub> abgeschätzt und vorhergesagt und die Dichtigkeit und Sicherheit des Reservoirs beurteilt werden können, eingesetzt.

### 5.3.4 Bisher in Ketzin erzielte Ergebnisse

Der Standort Ketzin wurde im Jahr 2007 durch das Abteufen von drei Bohrungen entwickelt. Ein poröser Sandstein wurde so in einer Tiefe von 630 m bis 650 m erschlossen [12]. Die drei Bohrungen weisen eine gute hydraulische Verbindung auf [13]. Der Injektionsprozess in Ketzin verläuft sicher und verlässlich seit Juni 2008 [10, 11]. Seit dem wurden über 49.400 Tonnen CO<sub>2</sub> in den geologischen Speicher gepumpt (Stand vom 23.5.2011). Die Aufnahmefähigkeit des porösen Sandsteins ist so gut, dass der von den Bergbehörden genehmigte, maximale Verpressdruck signifikant unterschritten wird. Auf Basis der gewonnenen Felddaten und der im Labor bestimmten Gesteinsparameter [14] wird mit Hilfe der numerischen Simulationsprogramme der Injektionsprozess und die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> im Reservoir nachvollzogen [15] sowie die Sensitivität bezüglich der Heterogenität der hydraulischen Parameter studiert [16].

Die wissenschaftlichen Erfahrungen am Standort Ketzin beruhen insbesondere auf einem geochemischen und geophysikalischen Überwachungsprogramm, das im internationalen Vergleich zum Modernsten und Umfangreichsten zählt. Zentral hierbei ist nicht nur die Kombination der verschiedenen Methoden wie Geoelektrik, Seismik, Temperatur- und Drucküberwachung sowie Fluid- und Gasproben, sondern auch die Kombination von unterschiedlichen Messanordnungen mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösungsvermögen innerhalb der einzelnen Methoden. Diese zusammen haben eine erfolgreiche und für zukünftige Projekte vielversprechende Tomographie des Untergrundes ermöglicht [17, 18]. Mit Hilfe geo-

physikalischer Messungen lässt sich die Ausbreitung des Kohlendioxids im Untergrund abbilden. Wiederholte seismische Messungen zeigen die Veränderungen elastischer Eigenschaften des Gesteins, die durch den Eintrag von Kohlendioxid entstehen. Wiederholte geoelektrische Messungen zeigen Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Gesteins aufgrund der Kohlendioxid-Injektion. Beide Verfahren erlauben eine langfristige Beobachtung des Kohlendioxids in der Injektionsphase und nach Ende der Injektion. Insbesondere kann mit ihnen auch die Dichtigkeit des Deckgebirges ohne Beobachtungsbohrungen überprüft werden.

## 5.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Mensch greift durch seine Kohlenstoffdioxid-Emissionen wesentlich in den Kohlenstoffkreislauf der Erde ein. Im Rahmen der Klimapolitik wird daher die Lagerung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in tiefe Gesteinschichten erwogen. Die Senken, in denen es langfristig gespeichert werden soll, sind tiefe, Salzwasser führende Grundwasserleiter. Oberhalb der porösen Sandsteinspeicher, in die das CO<sub>2</sub> eingebracht werden soll, muss eine Deckschicht das aufsteigende Gas zurückhalten. Mit der Zeit werden dann wesentliche Teile kapillar im Porenraum gebunden, als Kohlensäure im Wasser gelöst, beziehungsweise zu Carbonaten mineralisiert. Beachtet werden müssen potenzielle Leckagewege. Es muss in dem Rahmen ausgeschlossen werden, dass der Mensch oder die Umwelt durch zu hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gefährdet werden. Dies wird durch umfangreiche Überwachungsmethoden gewährleistet. Am Beispiel des Standortes Ketzin kann gezeigt werden, dass die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung im Forschungsmaßstab sicher und verlässlich durchführbar ist.

### 5.4.1 Danksagung

Mein Dank gilt Birgit Schöbel für die Erstellung der Abbildungen. Das Zentrum für CO<sub>2</sub>-Speicherung bedankt sich für die gute Zusammenarbeit am Standort Ketzin bei seinen nationalen und internationalen Projektpartnern, zu denen Universitäten, Forschungseinrichtungen, Industriekonzerne und mittelständische Unternehmen zählen. Unterstützung erfahren wir auch durch die Stadtgemeinde Ketzin sowie die Genehmigungsbehörden, die von Beginn an in die Projektentwicklung eingebunden waren. Der Pilotstandort Ketzin hat finanzielle Förderung durch die Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF) sowie Wirtschaft und Technologie

(BMWi), dem Land Brandenburg und der Europäischen Union bekommen, ohne die unsere Arbeiten im Gelände nicht möglich gewesen wären.

## Literatur

- [1] M. Kühn, “Chancen und Risiken der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung. Chemie in unserer Zeit,” *Chemie in unserer Zeit*, vol. 45, no. 2, pp. 126–138, 2011. doi:10.1002/ciuz.201100538.
- [2] L. Stroink, J. P. Gerling, M. Kühn, and F. R. Schilling, *Die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub>. Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven. GEOTECHNOLOGIEN Science Report No. 14*. Potsdam: Koordinierungsbüro Geotechnologien, 2009.
- [3] IPCC, *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds: B. Metz, O. Davidson, H.C. de Coninck, M. Loos, L.A. Meyer)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [4] P. Falkowski, R. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Höglers, S. Linder, F. Mackenzie, B. Moore III, T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek, and W. Steffen, “The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System,” *Science*, vol. 290, no. 5490, p. 291–296, 2000. doi: 10.1126/science.290.5490.291.
- [5] S. Knopf, F. May, C. Müller, and J. Gerling, “Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen,” *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, vol. 60, no. 4, p. 76–80, 2010.
- [6] F. May, S. Brune, J. Gerling, and P. Krull, “Möglichkeiten zur untertägigen Speicherung von CO<sub>2</sub> in Deutschland. Eine Bestandsaufnahme,” *Geotechnik*, vol. 26, no. 3, p. 162–172, 2003.
- [7] R. Sedlacek, “Untertage-Gasspeicherung in Deutschland,” *Erdgas, Erdöl, Kohle*, vol. 125, no. 11, p. 412–426, 2009.
- [8] S. Gilfillan, B. Sherwood Lollar, G. Holland, D. Blagburn, S. Stevens, M. Schoell, M. Cassidy, Z. Ding, Z. Zhou, G. Lacrampe-Couloume, and C. Ballentine, “Solubility trapping in formation water as dominant CO<sub>2</sub> sink in natural gas fields,” *Nature*, vol. 458, p. 614–618, 2009. doi:10.1038/nature07852.

- [9] A. Förster, B. Norden, K. Zinck-Jorgensen, P. Frykman, J. Kulenkampf, E. Spangenberg, J. Erzinger, M. Zimmer, J. Kopp, G. Borm, C. Juhlin, C. Cosma, and S. Hurter, “Baseline Characterization of the CO<sub>2</sub>SINK Geological Storage Site at Ketzin, Germany,” *Environmental Geosciences*, vol. 133, p. 145–161, 2006.
- [10] F. Schilling, G. Borm, H. Würdemann, F. Möller, M. Kühn, and CO<sub>2</sub>SINK Group, “Status Report on the First European On-Shore CO<sub>2</sub> Storage Site at Ketzin (Germany). Greenhouse Gas Control Technologies 9,” *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, p. 2029–2035, 2009. doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.264.
- [11] H. Würdemann, F. Möller, M. Kühn, W. Heidug, N. Christensen, G. Borm, and F. Schilling, “CO<sub>2</sub>SINK-From Site Characterisation and Risk Assessment to Monitoring and Verification. One Year of Operational Experience with the Field Laboratory for CO<sub>2</sub> Storage at Ketzin, Germany,” *International Journal of Greenhouse Gas Control Technologies*, vol. 4, no. 6, p. 938–951, 2009. doi: 10.1016/j.ijggc.2010.08.010.
- [12] B. Prevedel, L. Wohlgemuth, B. Legarth, J. Henningsen, H. Schütt, C. Schmidt-Hattenberger, B. Norden, S. Hurter, and A. Förster, “The CO<sub>2</sub>SINK Boreholes for Geological CO<sub>2</sub>-Storage Testing. Greenhouse Gas Control Technologies 9,” *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, p. 2087–2094, 2009. doi:10.1016/j.egypro.2009.01.272.
- [13] B. Wiese, J. Böhner, C. Enachescu, H. Würdemann, and G. Zimmermann, “Hydraulic Characterisation of the Stuttgart Formation at the Pilot Test Site for CO<sub>2</sub>-Storage, Ketzin, Germany,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 6, p. 960–971, 2010. doi: 10.1016/j.ijggc.2010.06.013.
- [14] K. Zemke, A. Liebscher, M. Wandrey, and C. Group, “Petrophysical analysis to investigate the effects of carbon dioxide storage in a subsurface saline aquifer at ketzin, germany (co<sub>2</sub>sink),” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 6, p. 990–999, 2010. doi: 10.1016/j.ijggc.2010.04.008.
- [15] T. Kempka, M. Kühn, H. Class, P. Frykman, J. Kopp, C. Nielsen, and P. Probst, “Modelling of CO<sub>2</sub> arrival time at Ketzin. Part I,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 6, p. 1007–1015, 2010. doi: 10.1016/j.ijggc.2010.07.005.

- [16] U. Lengler, M. De Lucia, and M. Kühn, “The Impact of Heterogeneity on the Distribution of CO<sub>2</sub>. Numerical Simulation of CO<sub>2</sub> Storage at Ketzin,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 6, p. 1016–1025, 2010. doi: 10.1016/j.ijggc.2010.07.004.
- [17] D. Kießling, C. Schmidt–Hattenberger, H. Schuett, F. Schilling, K. Krueger, B. Schoebel, E. Danckwardt, J. Kummerow, and CO<sub>2</sub>SINK Group, “Goelectrical Methods for Monitoring Geological CO<sub>2</sub>–Storage. First Results from Cross–Hole and Surface–Downhole Measurements from the CO<sub>2</sub>SINK Test Site at Ketzin (Germany),” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 5, p. 816–826, 2010. doi:10.1016/j.ijggc.2010.05.001.
- [18] C. Juhlin, P. Bergmann, R. Giese, J. Götz, A. Ivanova, N. Juhojuntti, A. Kashubin, S. Lüth, C. Yang, and F. Zhang, “Preliminary Results from 3D Repeat Seismics at the CO<sub>2</sub>SINK Injection Site, Ketzin, Germany,” in *72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, Barcelona, Spain, 14–17 June 2010, P201*, 2010.

# Kapitel 6

## Perspektiven für eine effiziente und nachhaltige Mobilität

*Rolf Scharwächter*

Menschen müssen und wollen mobil, das heißt beweglich sein. Die Mobilität von Menschen sichert Arbeit und Kommunikation. Die Mobilität von Gütern sichert Lebensfähigkeit und Lebensqualität. Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Lebens, ebenso wie Energie, Wasser, Luft und Licht.

Die vergangenen 150 Jahre der Mobilität waren durch die Erschließung der Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas, die Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse und die darauf aufbauende Industrialisierung geprägt. Mitte des 19. Jahrhunderts begann die Mobilität von Personen und Gütern mit der Eisenbahn. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts folgten zunächst die Mobilität mit dem Automobil und später die Mobilität mit dem Flugzeug. Die Industrialisierung von Automobil, Eisenbahn und Flugzeug, ihre Perfektionierung und Vervielfältigung sowie ihre Nutzung für den Transport von Menschen und Gütern begründen im Wesentlichen den Wohlstand der Industrieländer. Dieser Wohlstand ist Vorbild für die Entwicklungs- und Schwellenländer.

Heute stehen das grenzenlose Wachstum des Verkehrs, die Effizienz der zugrunde liegenden Technologien, die Endlichkeit der genutzten Ressourcen Energie und Rohstoffe und die Wirkungen auf Umwelt und Klima in Frage. Diese wurde bereits 1972 von Meadows in seinem Buch „Die Grenzen des Wachstums, zur Lage der Menschheit“ aufgeworfen. Seitdem werden diese Fragen rational und emotional in Gesellschaft, Politik, Wirtschaft und Wissenschaft erörtert.

In meinem Beitrag werde ich folgende Themen ansprechen:

- Bedeutende Trends mit Wirkung auf die Mobilität (Kapitel 6.1)
- Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsträger als Mittel der Mobilität (Kapitel 6.2)
- Personenwagen und Nutzfahrzeuge als vorherrschende Verkehrsträger, ihre alternativen Antriebstechnologien (Kapitel 6.3)
- Wertung und Ausblick (Kapitel 6.4)

## 6.1 Bedeutende Trends mit Wirkung auf die Mobilität

Die Zukunft der Mobilität wird durch unser heutiges Erkennen und Handeln bestimmt. Darauf wirken Veränderungen im Persönlichen und Veränderungen in Gesellschaft, Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Umwelt

Solche Trends mit Wirkung auf die Mobilität sind:

- das Wachstum der weltweiten Bevölkerung, besonders in den Ballungsräumen (Kapitel 6.1.1)
- die Veränderungen in der Gesellschaft, besonders Alterung und Individualisierung (Kapitel 6.1.2)
- die Endlichkeit der Ressourcen Energie und Rohstoffe (Kapitel 6.1.3)
- die Belastung der Umwelt und Begrenzung der Emissionen (Kapitel 6.1.4), sowie
- die Virtualisierung der Information und Kommunikation (Kapitel 6.1.5)

### 6.1.1 Wachstum der Bevölkerung in Industrieländern sowie Entwicklungs- und Schwellenländern und besonders in Ballungsräumen

Die Weltbevölkerung wird laut UNO explosiv von 6 Mrd. heute auf 9 Mrd. im Jahr 2050 wachsen. Gründe sind die zunehmende Lebenserwartung dank der Fortschritte der Ernährung und der Medizin. Dieses Bevölkerungswachstum konzentriert sich auf die Schwellenländer Asiens und die Entwicklungsländer Afrikas. Die Bevölkerung Europas und Nordamerikas bleibt nur dank Zuwanderung konstant. Während die Mobilitätsnachfrage in den Industrieländern eher reif und gesättigt ist, wird der Mobilitätsbedarf in den Entwicklungs- und Schwellenländern signifikant wachsen

Es werden besonders die Städte wachsen, in Industrieländern aufgrund der Stadt mit dem Angebot von Versorgung, Gesellschaft und Kultur, in Schwellen- und Entwicklungsländern aufgrund der Stadt mit höherem Wohlstand im Vergleich zum Umland. Daraus folgt parallel eine Ausdünnung des Umlands.

Heute leben bereits 3 Mrd. Menschen, das sind 50 % der Weltbevölkerung in urbanen Räumen. In den Megastädten, heute 30 mit mehr als 10 Mio. Menschen, kulminieren organisatorische, soziale und ökologische Probleme. Megastädte werden mit diesem Trend zu Vorbildern für das Zusammenspiel von Arbeiten, Wohnen und Umwelt. Die Mobilität wird dem Wachstum der Ballungsräume und der Ausdünnung des Umlands folgen.

### 6.1.2 Veränderungen in der Gesellschaft

Die Bevölkerung wird weltweit älter aufgrund der zunehmenden Lebenserwartung. In Europa werden im Jahr 2050 von 400 Mio. Menschen 140 Mio. Menschen älter als 60 Jahre sein. Diese älteren Menschen erwarten entsprechende Angebote für Ihren Bedarf an Mobilität.

In der Gesellschaft der Industrieländer wird die individuelle Lebensweise ausgeprägter. Die differenzierten Formen von Lebensstil, Lebensqualität und Lebensräumen haben ausgeprägte körperliche und geistige Mobilität zur Folge. Die Zeit wird weiter an Bedeutung gewinnen.

Die steigende Nachfrage nach Konsumgütern führt zur drastischen Zunahme des Wirtschaftsverkehrs. Die Forderung ist eine Lieferung über große Entfernungen mit individuellen Erzeugnissen, kurzen Lieferzeiten und hoher Lieferqualität. Besonders in Ballungsräumen belastet der Wirtschaftsverkehr mit Ver- und Entsorgung die Lebensqualität.

Die wachsende regionale und globale Arbeitsteilung in Verbindung mit der Vielfalt der Produkte und Dienstleistungen erzwingt effiziente logistische Konzepte. Die Mobilitätsträger arbeiten zunehmend vernetzt. Es gilt jedoch: keine Tonne wird ohne Nachfrage bewegt.

### 6.1.3 Endlichkeit der Ressourcen Energie und Rohstoffe

Die Grundlage der Energieversorgung ist in den Industrieländern Kohle, Erdöl, Erdgas, Kernenergie und erneuerbare Energie. In den Industrieländern sind die Ziele der Energiewirtschaft ein Energiemix zur Sicherung der Versorgung und Dämpfung der Preisschwankungen, eine Minderung der Abhängigkeit von Erdöl und Erdgas, eine Steigerung der Energieeffizienz und eine Senkung der Emissionen.

Im Jahr 2020 wird nach heutigem Wissen die Hälfte der weltweiten Erdöl- und Erdgasvorkommen verbraucht sein. Man spricht von Peak Oil. Die Energieressourcen werden von wenigen meist staatlichen Organisationen kontrolliert. Als Folge der Endlichkeit werden die Versorgungsunsicherheit und die Schwankung der Energiepreise zunehmen.

Die Industrieländer verbrauchen 60 % der weltweiten Energie. In den Industrieländern haben als Energieträger Kernenergie zugenommen und Erdöl und Kohle abgenommen. In den Schwellenländern, insbesondere China, hat Kohle zugenommen. In China wird ein neues Kohlekraftwerk pro Monat in Betrieb genommen. Kohlekraftwerke sind weltweit für 40 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich und daher die hauptsächliche Gefahr für das globale Klima.

In Deutschland werden die Fragen der Energieversorgung, so in der aktuellen politischen Auseinandersetzung, kontrovers diskutiert. In Deutschland herrscht für die Energieversorgung unstete Planwirtschaft und nicht verlässliche Marktwirtschaft. In Deutschland werden andere Lösungen gefördert als in den Nachbarstaaten. Eine Seite muss irren.

Ein ähnlicher Trend wie bei der weltweiten Energieversorgung gilt auch für die weltweite Rohstoffversorgung. Die Industrieländer verbrauchen 80 % der geförderten Rohstoffe. Neben den klassischen Konstruktionswerkstoffen Stahl, Leichtmetalle und Polymere haben die sogenannten Seltenen Erden zunehmende industrielle Bedeutung für Elektronikmodule, Solarzellen oder Batterien. Das Vorkommen dieser Seltenen Erden ist endlich und auf wenige Länder konzentriert. USA und China bauen bereits strategische Reserven auf. Diese Seltenen Erden werden zudem aufgrund ihrer geringsten Anteile in den Legierungen nicht durch Recycling wiedergewonnen.

#### **6.1.4 Belastung der Umwelt und Begrenzung der Emissionen**

Die troposphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration ist in den vergangenen 50 Jahren gravierend angestiegen. Damit einher geht eine Klimaerwärmung.

Heute erzeugen die Entwicklungs- und Schwellenländer weltweit 50 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Deutschland trägt nur 3 % zu den weltweiten Emissionen bei.

Die Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Emission ist auf verschiedenen internationalen Klimakonferenzen kontrovers und ergebnislos verhandelt worden. Die Interessen der Industrieländer auf der einen Seite und der Entwicklungs- und Schwellenländer auf der anderen Seite waren nicht auszugleichen.

Der brasilianische Wirtschaftsminister sagte ironisch auf der Klimakonferenz in Kopenhagen: „Die Schwellen- und Entwicklungsländer sind zum Nachtisch geladen und sollen das gesamte Menü bezahlen.“ Einem System für den weltweiten Handel mit Emissionszertifikaten wurde nicht zugestimmt. Zudem haben die Entwicklungs- und Schwellenländer in China einen starken Sprecher mit Eigeninteressen gefunden.

Dennoch besteht für Europa die Übereinkunft, das vorherige Abkommen von Tokyo zu erfüllen. Danach sind für Deutschland die Emissionen vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2012 um 21 % zu verringern. Deutschland hat bereits im Jahr 2008 dieses Ziel erfüllt.

Meine Folgerung für die Begrenzung der Emissionen ist: Eine ausgewogene und weitgehende politische Vorgabe in Europa sollte ein für die gesamte Wirtschaft gültiger Emissionshandel mit einem einheitlichen Preis

für CO<sub>2</sub> pro Tonne sein. Dann könnten die Wirtschaft und der Kunde die günstigste Energieart wählen. Dann könnten auch die die Staatshaushalte belastenden Subventionen für alternative Energiearten, insbesondere für Solarenergie und Windkraftenergie, zurückgeführt werden.

### **6.1.5 Virtualisierung der Information und Kommunikation**

Zunehmend wird die körperliche Mobilität substituiert durch die geistige Mobilität. Die Trends sind Always-On, Any-to-Any und Hear and Look. Der virtuelle Arbeitsplatz zu Hause, auf Reisen und beim Kunden, die virtuelle Produktentwicklung und das virtuelle Produkt- und Leistungsangebot sowie die virtuellen Marktplätze mit Wettbewerbern und Lieferanten nehmen zu. Es wachsen virtuell vernetzte Unternehmen, die für Projekte zeitlich begrenzt ergänzende Fähigkeiten einbinden.

Dieser Trend wird den Personenverkehr, nicht aber den Güterverkehr verändern. Wir werden weiter Wein aus Australien, Früchte aus Südamerika und Wasser aus Südeuropa kaufen. Man spricht von Patchwork Ökologisierung.

Meine Wertung zu den vorgestellten Trends mit Wirkung auf die Mobilität ist: Die Endlichkeit der Ressourcen Energie und Rohstoffe ist eine Veränderung, die enge Grenzen setzt. Die übrigen Veränderungen scheinen durch Innovationen und Verhalten beherrschbar zu sein.

## **6.2 Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsträger als Mittel der Mobilität**

Die Mobilität von Personen und Gütern hat Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsträger zur Voraussetzung. Die optimalen Lösungen zu Effizienz und Nachhaltigkeit sind von der jeweiligen Transportaufgabe abhängig.

Für den Personenverkehr stehen in Europa Personenkraftwagen, Eisenbahn, Flugzeug, Schiff oder Fahrrad zur Wahl. Ihre Anteile am Personenverkehr sind heute 78 % Personenkraftwagen, 8 % öffentlicher Nahverkehr mit Omnibus, Straßenbahn oder U-Bahn, 7 % Eisenbahn und 6 % Flugzeug. Wenn man nur 10 % der Personenverkehrsleistung von der Straße auf die Schiene verlagern wollte, müsste man die Kapazität von Schiene und Eisenbahn verdoppeln.

Im Personenverkehr liegen die Vorteile bei Effizienz- und Nachhaltigkeit für Entfernungen über 300 km bei Flugzeug oder Eisenbahn, für Entfernungen über 100 km bei Personenkraftwagen oder Eisenbahn und in

Ballungsräumen bei öffentlichem Nahverkehr mit Omnibus, Straßenbahn oder U-Bahn.

Für den Personenverkehr in Ballungsräumen und besonders im ausgedünnten Umland hat der flexible Omnibus bei Energieverbrauch und Emission Vorteile gegenüber der starren und zudem fixkostenintensiven Straßenbahn oder U-Bahn.

Der Personenverkehr in Europa wird langfristig entsprechend den eingangs vorgetragenen Trends verhalten wachsen. Der Personenwagen ist und bleibt der vorherrschende Verkehrsträger.

Für den Güterverkehr stehen in Europa das Nutzfahrzeug mit Lastkraftwagen und Transportern, Eisenbahn oder Schiff zur Wahl. Ihre Anteile am Güterverkehr sind heute Nutzfahrzeug 72 %, Eisenbahn 16 % und Schiff 11 %. Wenn man nur 20 % der Güterverkehrsleistung von der Straße auf die Schiene verlagern wollte, müsste man die Kapazität von Eisenbahn und Schiene verdoppeln.

Der Güterverkehr wird in Europa nach den zuvor vorgetragenen Trends erheblich zunehmen.

Zur Bewältigung dieser Nachfrage werden für den Güterverkehr alle Verkehrsträger bis an ihre Infrastrukturgrenzen gefordert. Aufgrund der Nachfrage nach Zeit bestimmten und sogar Reihenfolge bestimmten Transporten wird der Zuwachs des Straßengüterverkehrs ein Vielfaches des Zuwachses des Schienengüterverkehrs betragen. Den Gütersammel- und Verteilverkehr wird weiter das Lieferfahrzeug dominieren. Auf einem Lastkraftwagen war das Bonmot zu lesen: Bis man Äpfel mit E-Mail versenden kann, müssen wir uns die Straße noch teilen.

Eisenbahn und Schiff haben demgegenüber Vorteile bei Schütt- und Massengütern, über große Entfernungen und bei einem Be- und Entladeort. Im grenzüberschreitenden europäischen Schienenverkehr bestehen immer noch erhebliche technische und systemische Beschränkungen.

Durch die globalen Produktionsnetzwerke wird die Güterverkehrsnachfrage mit Flugzeug und Nutzfahrzeug stark wachsen.

Ein Beispiel ist die Produktion eines Mobiltelefons für den europäischen Markt in Ungarn mit Zulieferungen der Kamera aus Japan, der SIM-Karte aus Indien, des Ladekabels aus China und des Gehäuses aus Ungarn. Dem liegt die von Politik und Markt geforderte Strategie zugrunde: Think global, act local.

Durch den globalen Produktionsverbund wird für spezifische Produkte die Luftfahrtlogistik zunehmen. Die Luftfahrtindustrie hat sich verpflichtet, das erwartete Wachstum rohstoff- und emissionsneutral zu erreichen.

Die Flugzeugtechnologie hat nur geringe Alternativen zur Triebwerktechnik und zum Kerosin.

Die Folgerungen sind: Die Diskussion über Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsträger erschöpft sich allzu oft in einem Gegeneinander um politische Regelungen und finanzielle Zuwendungen. Der Wettbewerb sollte nicht durch Regelungen oder Steuern verzerrt werden. Die wachsenden Verkehrsströme sind nur zu bewältigen, wenn das Ziel eines Verkehrsträger übergreifenden und vernetzten Gesamtsystems mit Nutzung der spezifischen Eigenschaften verfolgt wird. Die europäische Kommission hat daher kürzlich einen Aktionsplan zur Einführung intelligenter Verkehrsströme veröffentlicht. Die Ziele sind Effizienz, Nachhaltigkeit, Kapazität und Kooperation.

So ist für den Personenverkehr die Verkehrsträger übergreifende Erfassung und Vernetzung von Daten zur Information und Navigation zu verbessern. Ziel ist ein telematikgestützter intermodaler Verkehr.

Die Vernetzung des Güterverkehrs auf Wasser, Schiene und Straße ist durch intermodalen Verkehr mit Containern und Terminals zu verbessern.

Die wachsende Grundlast im Güterverkehr und die zunehmende Spitzenlast im Personenverkehr können zu einem Kollaps im Straßenverkehr führen. Im Vergleich der Staufreiheit als Maß für die Qualität der Verkehrsinfrastruktur liegt Deutschland in Europa auf dem vorletzten Platz.

Wirtschaft und Verkehr wachsen seit 50 Jahren gleichförmig. Personenwagen und Nutzfahrzeuge bleiben die dominanten Verkehrsträger. Die Steuern und Abgaben der Straßenverkehrsträger sind viermal so hoch wie die Kosten der Straßenverkehrsinfrastruktur. Die Automobilindustrie ist ein entscheidender Faktor für Wirtschaft und Beschäftigung in Deutschland. Sie verantwortet mit 320 Mrd. € 20 % des Umsatzes und mit 20 Mrd. € 35 % der Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen der deutschen Industrie.

### **6.3 Personenwagen und Nutzfahrzeuge als vorherrschende Verkehrsträger, ihre Antriebstechnologien**

Für die Automobilindustrie ist die größte Herausforderung der nächsten Zeit das Erreichen der politisch gesetzten Umweltschutzziele. Damit verbunden ist eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs. Laut Vorgabe der Europäischen Union soll die CO<sub>2</sub>-Emission für die Flotte eines Personenwagenherstellers im Jahr 2012 nur noch 120 g CO<sub>2</sub>/km betragen. Der durchschnittliche Wert aller in 2010 in Deutschland zugelassenen Perso-

nenkraftwagen war 154 g CO<sub>2</sub>/km. Es wird erörtert, für das Jahr 2020 einen Wert von 95 g CO<sub>2</sub>/km zu fordern.

Ähnlich anspruchsvolle Vorgaben sollen auch für Nutzfahrzeuge gültig werden. Im Jahr 2017 soll für die Flotte von leichten Nutzfahrzeugen eines Herstellers ein Wert von 175 g CO<sub>2</sub>/km erreicht werden. Der durchschnittliche Wert der im Jahr 2010 in Deutschland zugelassenen leichten Nutzfahrzeuge war 210 g CO<sub>2</sub>/km. Für das Jahr 2020 soll sogar ein Wert von 147 g CO<sub>2</sub>/km erreicht werden. Dies erfordert auch emissionslose Antriebe. CO<sub>2</sub> Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge und Omnibusse werden sicher folgen.

Mit diesen weitgehenden Umweltschutzzielen wird die Automobilindustrie und letztlich der Nutzer eines Automobils besonders belastet. Im Sinne des zuvor geforderten freien Emissionshandels mit einem einheitlichen Preis pro Tonne CO<sub>2</sub> sollten Emissionen dort gesenkt werden, wo es volkswirtschaftlich am günstigsten ist. Die Senkung bei Kraftfahrzeugen ist eine teure Lösung.

Für Personenwagen und Nutzfahrzeuge stehen als Antriebstechnologien zur Wahl:

#### *Reife Antriebe*

- die Verbrennungsmotoren Ottomotor und Dieselmotor sowie

#### *Neue Antriebe*

- der batterieelektrische Antrieb, allgemein als Elektromotor bezeichnet
- die Brennstoffzelle in Kombination mit dem batterieelektrischen Antrieb und schließlich
- der Hybridantrieb in Kombination Verbrennungsmotor und batterieelektrischer Antrieb

### **6.3.1 Verbrennungsmotoren Ottomotor und Dieselmotor**

Bei den Verbrennungsmotoren sind die Möglichkeiten zum Verringern von Emission und Kraftstoffverbrauch keineswegs ausgeschöpft.

Zwischen den Bauweisen Ottomotor und Dieselmotor besteht bekanntlich ein Wettbewerb. Der Ottomotor hat im Vergleich Vorteile bei der Abgasemission und Nachteile beim Kraftstoffverbrauch. Der Dieselmotor hat umgekehrt Vorteile beim Kraftstoffverbrauch und Nachteile bei der Abgasemission. Wäre in den USA der Anteil des Dieselmotors so hoch wie in Europa, bräuchte das Land kein Erdöl zu importieren.

Die Entwicklung des Ottomotors konzentriert sich daher auf die Senkung des Kraftstoffverbrauchs. Die größten Chancen bestehen einsatzbedingt im Teillastbereich, so im städtischen Stop-and-go-Verkehr. Möglichkeiten sind Hubraumverkleinerung, Aufladung, Ladungswechseleoptimierung und Thermomanagement.

Beim Dieselmotor sind weitere Möglichkeiten zum Verringern der Abgasemission Aufladung, Ladungswechseleoptimierung und Thermomanagement. Der Kraftstoffverbrauch des Dieselmotors wird weiter um 30 % niedriger als der des Ottomotors sein.

Ein weiteres Potential der Verbrennungsmotoren ist die Niedertemperaturverbrennung. Hierbei werden ähnliche Ansätze bei Otto- und Dieselmotor verfolgt. Die beiden Bauweisen nähern sich an.

Das Ergebnis dieser Entwicklungen könnte sein, daß ein Personenwagen der Kompaktklasse mit Dieselmotor mittelfristig eine Emission von 75 g CO<sub>2</sub>/km erreicht.

Dieser Erwartung stehen gegenläufige gesetzliche Regelungen entgegen, wie zu Sicherheit und zu Außengeräusch sowie Kundenwünsche, wie Klimaanlage oder elektrische und elektronische Bedienmodule. Eine Klimaanlage verbraucht etwa 8 % der Energie.

Langfristiges Ziel der Automobilindustrie ist jedoch eine Antriebstechnologie ohne Emission und ohne Verwendung fossiler Kraftstoffe. Entwicklungsschwerpunkte sind der batterieelektrische Antrieb und der Antrieb mit Brennstoffzelle in Verbindung mit dem batterieelektrischen Antrieb. Kurzfristiger Entwicklungsschritt ist der Hybridantrieb, der Elemente des batterieelektrischen Antriebs mit solchen des Verbrennungsmotors kombiniert. Die Entwicklungsstufen sind Micro Hybrid, Mild Hybrid und Full oder Plug In Hybrid.

### 6.3.2 Batterieelektrischer Antrieb

Die wesentlichen Bauelemente des batterieelektrischen Antriebs sind Elektromotor und Batterie.

Für die Serienfertigung und Marktdurchdringung des batterieelektrischen Antriebs sind einige Voraussetzungen erforderlich:

1. Verfügbarkeit von effizienten Batterien
2. Aufbau einer standardisierten Infrastruktur zum Laden der Batterien und besonders
3. Aufbau einer Wirtschaft auf der Grundlage regenerativ erzeugter Energie

Unter diesen Voraussetzungen hat der batterieelektrische Antrieb große Stärken. Er weist auf: gute Beschleunigung, geringe Geräusche und keine Abgase. Eine anspruchsvolle Hürde unter diesen Voraussetzungen ist der Energiespeicher, die Batterie.

Die bislang im Automobilbau eingesetzten blei- oder nickelbasierten Batterien haben gravierende Nachteile: Die Ladezeit beträgt mehrere Stunden und die Energiedichte ist gering.

Die Entwicklung setzt derzeit auf Lithium Batterien. Sie werden, wie bekannt, seit längerer Zeit in der Elektronik für Mobiltelefone, Kameras und Computer verwendet.

Darüber hinaus setzt die Forschung auf Metall/Luft Batterien sowie Lithium/Luft Batterien. Zink/Luft Batterien werden seit längerer Zeit in Hörgeräten eingesetzt.

Das Ziel der Forschung auf dem Feld der Batterien ist, Leistungsdichte, Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Sicherheit und besonders die Reichweite zu erhöhen. Allerdings bestehen grundsätzliche physikalische Grenzen, die die Energiedichte des batterieelektrischen Antriebs beschränken.

Zu Fragen der Standardisierung haben die beitragenden deutschen Unternehmen der Branchen Automobilbau, Energieversorgung, Elektrotechnik und Chemie eine Plattform Elektromobilität gebildet.

### **6.3.3 Brennstoffzelle mit batterieelektrischem Antrieb**

Die Elemente des Antriebs Brennstoffzelle mit batterieelektrischem Antrieb sind zum einen die bereits genannten des batterieelektrischen Antriebs, also Elektromotor und Batterie, zum andern die der Brennstoffzelle, also Zelle und Tank für Wasserstoff.

In der Brennstoffzelle erzeugen die Gase Wasserstoff und Sauerstoff durch eine kontrollierte elektrochemische Reaktion elektrische Energie und Wärme unter Abgabe von Wasser. Die gewonnene elektrische Energie wird in der Batterie gespeichert. Die übrigen Prozesse gleichen dem batterieelektrischem Antrieb.

Die Vorteile einer Brennstoffzelle mit batterieelektrischem Antrieb sind eine beherrschbare Betankung, ähnlich der heute bekannten Gasbetankung von Verbrennungsmotoren, eine rasche Betankung und eine Reichweite vergleichbar mit der eines Verbrennungsmotors.

Für eine Serienfertigung und Marktdurchdringung der Brennstoffzelle mit batterieelektrischem Antrieb sind eine Reihe von Voraussetzungen erforderlich:

1. Aufbau einer Infrastruktur für die Versorgung und das Tanken mit Wasserstoff und
2. Aufbau einer Wirtschaft mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff

Für die Erzeugung und Verteilung des Wasserstoffs haben die Unternehmen der Branchen Automobilbau, Energieversorgung, Mineralölindustrie und Kältetechnik eine Initiative  $H_2$  vereinbart.

### 6.3.4 Hybridantrieb

Aufgrund des noch langfristigen Horizonts zur Marktdurchdringung der Elektroantriebe werden von der Automobilindustrie bereits heute Brückentechnologien in Form von Hybridantrieben angeboten. Er enthält alle Module des Verbrennungsmotors sowie alle Module des batterieelektrischen Antriebs. Ziel ist es, den Verbrennungsmotor stetig im optimalen Effizienz- und Emissionsbereich zu betreiben, den batterieelektrischen Antrieb für das Beschleunigen einzusetzen sowie Energie zurückzugewinnen und zu speichern. Es bestehen Stufen von Micro Hybrid über Mild Hybrid bis Full Hybrid oder Plug In Hybrid.

Die Stufe Micro Hybrid besitzt keinen batterieelektrischen Antrieb. Diese Stufe enthält Module zur Rückgewinnung von Energie.

Bei der Stufe Mild Hybrid unterstützt ein batterieelektrischer Antrieb mit geringer Leistung zeitweilig den Verbrennungsmotor. Diese Kombination bietet eine große Freiheit zur Steuerung des Verbrennungsmotors im verbrauch- und emissionsarmen Betrieb. Das bedeutet allerdings einen Mehrpreis für die zusätzlichen Komponenten Elektromotor und Batterie.

Die letzte Stufe ist der Full Hybrid oder Plug In Hybrid. Er bedeutet die Brücke mit allen Komponenten des Verbrennungsmotors und des batterieelektrischen Antriebs. Der batterieelektrische Antrieb verfügt über eine befriedigende Leistung und Reichweite. Die Batterie kann durch eine Station oder den Verbrennungsmotor aufgeladen werden.

## 6.4 Wertung und Ausblick

Die Wirkungsgrade der dargestellten Antriebe sind vom Tank bis zum Rad: Benzinmotor 20 %, Dieselmotor 25 %, Hybridmotor 30 % und Brennstoffzelle mit batterieelektrischem Antrieb 50 %. Dies spricht für den Elektromotor.

Weitere Chancen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs sind aber auch antriebsunabhängige Entwicklungen: Aerodynamik, Leichtbau mit Alumi-

nium oder faserverstärkten Kunststoffen, Roll- und Reibungswiderstand oder Getriebetechniken.

Die Technologieträger der deutschen Automobilunternehmen nutzen die gesamten Möglichkeiten dieser Antriebs- und Karosserietechniken. Ein solches Fahrzeug kann eine Emission von 50 g/km CO<sub>2</sub> erzielen. Für dieses Fahrzeug ist allerdings ein sehr hoher Serienpreis zu erwarten.

Wenn Deutschland seine anspruchsvollen Umweltschutzziele für die vorherrschenden Verkehrsträger Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge erreichen will, sind die Lösungen der Elektromotor mit Batterie und Brennstoffzelle. Damit wird allerdings nur der mobile Energiebedarf zu einem stationären Energiebedarf verlagert. Damit werden die Fragen zur Energiewirtschaft und zur Energieinfrastruktur, die in den vorhergehenden Ausführungen behandelt wurden, schwerwiegender und eindringlicher.

Wenn Kernenergie ausgeschlossen und durch Kohleenergie substituiert werden sollte, ist der alternative Antrieb durch Elektromotoren in der Energie- und Emissionsbilanz sinnlos.

Neben diesen offenen Fragen der Energiewirtschaft und der Versorgungsinfrastruktur stehen Fragen der Finanzierung der außerordentlich hohen Aufwendungen für Forschung und Entwicklung.

Grenzen sind zunehmend der Mangel an Ingenieuren und Naturwissenschaftlern. Die deutsche Automobilindustrie versucht heute, diese Grenzen durch globale Kooperationen zu überwinden.

Ein Risiko für das Land Baden-Württemberg ist der Wandel von einem mechanischen Antrieb zu einem elektrischen Antrieb. Hierfür sind neue Fähigkeiten erforderlich. Zur Unterstützung dieses Wandels hat das Land ein Netzwerk „automotive bw“ ins Leben gerufen.

Eine weitere offene Frage ist die Akzeptanz der Kraftfahrzeuge mit alternativem Antrieb im Markt. Im Grunde ist der Kunde mit der heutigen automobilen Technik vertraut und mit Funktion, Zuverlässigkeit und Infrastruktur einverstanden. Er benötigt keinen alternativen Antrieb. Er ist wahrscheinlich auch nicht bereit, Minderung des Komforts und noch weniger höhere Kosten anzuerkennen. Das Bekenntnis zum Umweltschutz endet gemeinhin bei der Geldbörse.

Die deutsche Automobilindustrie bietet seit 2009 Personenwagen mit Hybridantrieb und seit 2010 mit batterieelektrischem Antrieb an. Erste Personenwagen mit Brennstoffzelle und batterieelektrischem Antrieb sind 2016 zu erwarten.

Im Jahr 2010 wurden in Deutschland 500 Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb abgesetzt.

Die Prognose für die Marktdurchdringung im Jahr 2020 ist: In Deutschland wird dann der Marktanteil der Hybridantriebe auf 15 % und der Marktanteil der Elektroantriebe auf 2 % geschätzt. Dem entspricht das politische Ziel der Bundesregierung im Jahr 2020 mit 1 Mio Fahrzeugen mit emissionsfreiem Antrieb. Ein besonders ehrgeiziges Ziel hat China. Es beabsichtigt, das Land zu dem weltweit führenden Hersteller für Fahrzeuge mit Elektroantrieb und Hybridantrieb zu entwickeln und im Jahr 2020 einen Bestand von 4 Mio solcher Fahrzeuge zu erreichen.

Meine Prognose ist: Der Verbrennungsmotor wird im mittelfristigen Zeitraum seine aufgezeigten Potentiale erschließen und den Antrieb für Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge weiter dominieren. Der Elektromotor wird ihm aufgrund der ungelösten Voraussetzungen in einer Evolution, nicht in einer Revolution im langfristigen Zeitraum folgen.



## Kapitel 7

# Stromimport aus der Sahara: Grundlagen des DESERTEC Konzepts

*Franz Trieb und Hans Müller-Steinhagen*

### 7.1 Kurzfassung

Das vorliegende Paper zeigt die Perspektive einer nachhaltigen Bereitstellung von Strom und Trinkwasser für Europa (EU), den Mittleren Osten (ME) und Nordafrika (NA) und die entsprechende Wandlung des Versorgungssektors bis zum Jahr 2050. Es wird gezeigt, dass mit erneuerbaren Energiequellen und Effizienzgewinnen sowie der Nutzung fossiler Brennstoffe zum Ausgleich von Angebots- und Bedarfsengpässen ein Wechsel zu einer konkurrenzfähigen, sicheren und umweltkompatiblen Energieversorgung möglich ist.

Da mindestens zwei Jahrzehnte benötigt werden, bis die notwendigen Maßnahmen volkswirtschaftlich wirksam werden, sind unmittelbar politische Entscheidungen zur Schaffung geeigneter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen notwendig, die hier skizziert werden.

Eine Schlüsselrolle für das wirtschaftliche und physische Überleben der gesamten Region kommt der engen Kooperation zwischen der EU und den Staaten des Mittleren Ostens und Nordafrikas (MENA) bei der Markteinführung erneuerbarer Energie und einem Verbund durch Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ) zu.

### 7.2 Einleitung

Um den Übergang zu einer Energieversorgung realisieren zu können, die kostengünstig und umweltverträglich ist und auf gesicherten Ressourcen beruht, müssen die in Tabelle 1 genannten Kriterien angelegt werden, damit das langfristige Ergebnis einer umfassenden Definition von Nachhaltigkeit entspricht.

Ein zentrales Kriterium für die Elektrizitätserzeugung ist ihre stets bedarfsgerechte Verfügbarkeit. Heute wird dies durch den Verbrauch fos-

siler oder nuklearer Energiequellen in perfekt gespeicherter Form erreicht, aus denen jederzeit Nutzenergie bereitgestellt werden kann, egal wann und wo sie benötigt wird. Dies stellt die einfachste Art der bedarfsorientierten Energieversorgung dar. Allerdings zahlen wir für den Verbrauch der gespeicherten Energiereserven unseres Planeten einen hohen Preis: Sie werden in absehbarer Zeit erschöpft sein und ihre Abfallprodukte verschmutzen die Atmosphäre.

Tabelle 7.1: Angelegte Nachhaltigkeitskriterien für die Stromerzeugung

---

<i>Sicher</i>	verschiedene, sich ergänzende Quellen und Reserven elektrische Leistung nach Bedarf langfristig verfügbare Ressourcen sichtbare und zeitnah ausbaubare Technologie
<i>Kostengünstig</i>	niedrige Kosten keine langfristigen Subventionen
<i>Kompatibel</i>	geringe Emissionen Klimaschutz geringe Risiken fairer Zugang

---

Mit Ausnahme der Wasserkraft ist die Nutzung der existierenden natürlichen Energieflüsse für die Stromerzeugung bislang nicht weit verbreitet, weil sie sich verglichen mit fossilen und nuklearen Brennstoffen weniger leicht ausbeuten und speichern lassen.

Manche dieser Stromquellen können mit einem verträglichen Maß an technischem Aufwand über eine begrenzte Zeit gespeichert werden, andere müssen in Abhängigkeit ihrer Bereitstellung durch die Natur unmittelbar dann genutzt werden, wenn sie verfügbar sind (Tabelle 7.1, Tabelle 7.2). Die Stromversorgung der Zukunft muss eine ausgewogene Mischung aus Technologien und Ressourcen finden, die in der Lage ist, neben der Verfügbarkeit nach Bedarf auch sämtliche anderen Nachhaltigkeitskriterien zu erfüllen.

Tabelle 7.2: Portfolio von Technologien und Ressourcen für die Stromerzeugung

---

<i>ideal gespeicherte Energieträger</i>	Kohle, Braunkohle Erdöl, Erdgas Kernpaltung, Kernfusion
<i>speicherbare Energieträger</i>	Wasserkraft Biomasse Solarthermische Kraftwerke Geothermie (Hot Dry Rock)
<i>fluktuierende Energieträger</i>	Windenergie Photovoltaik Wellen, Gezeiten

---

Der vorliegende Bericht beschreibt das Ergebnis umfassender Studien am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und entwirft ein Szenario zur Deckung des Strombedarfs und zur Stromversorgung in einer integrierten EU-MENA-Region bis zur Mitte des Jahrhunderts und unterstreicht die Bedeutung internationaler Zusammenarbeit mit dem Ziel wirtschaftlicher und umweltverträglicher Nachhaltigkeit (MED-CSP 2005, TRANS-CSP 2006)[1, 2].

### 7.3 Strom- und Wasserbedarf nehmen zu

Die Hauptursache des zunehmenden Strom- und Wasserverbrauchs in der Region ist das Bevölkerungswachstum. Schätzungen der Vereinten Nationen zufolge wird die Bevölkerung in der Region Europa mit ca. 600 Mio. Einwohnern in etwa konstant bleiben, während die Region MENA von 300 Mio. im Jahr 2000 auf ebenfalls 600 Mio. bis zur Jahrhundertmitte anwachsen wird [3].

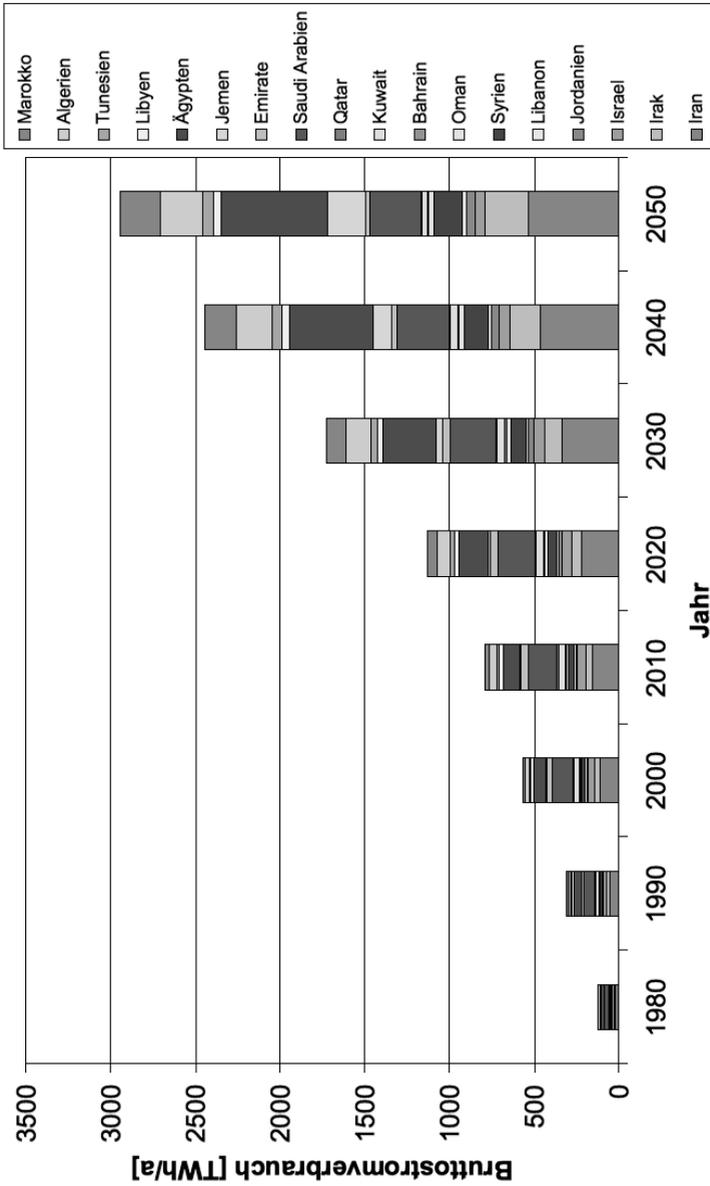


Abbildung 7.1: Szenario des Strombedarfs für die in der vorliegenden Studie untersuchten MENA-Länder [1]

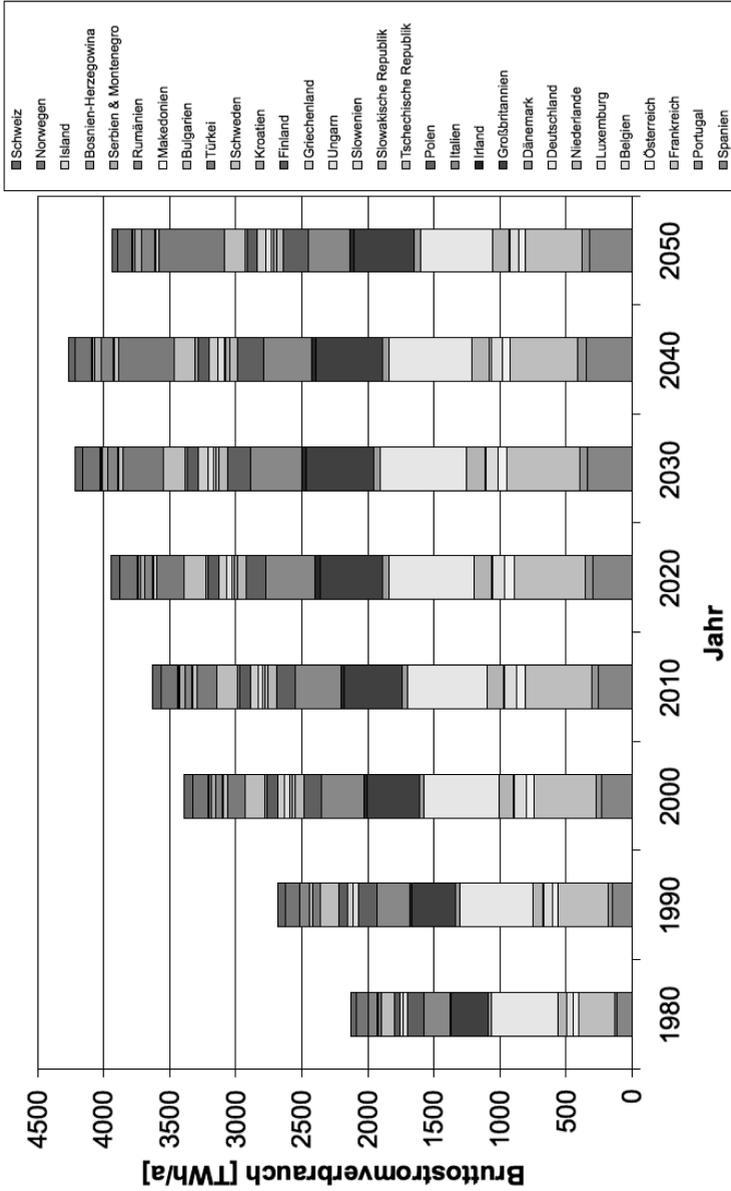


Abbildung 7.2: Szenario des Strombedarfs für die in der vorliegenden Studie untersuchten Länder Europas [2]

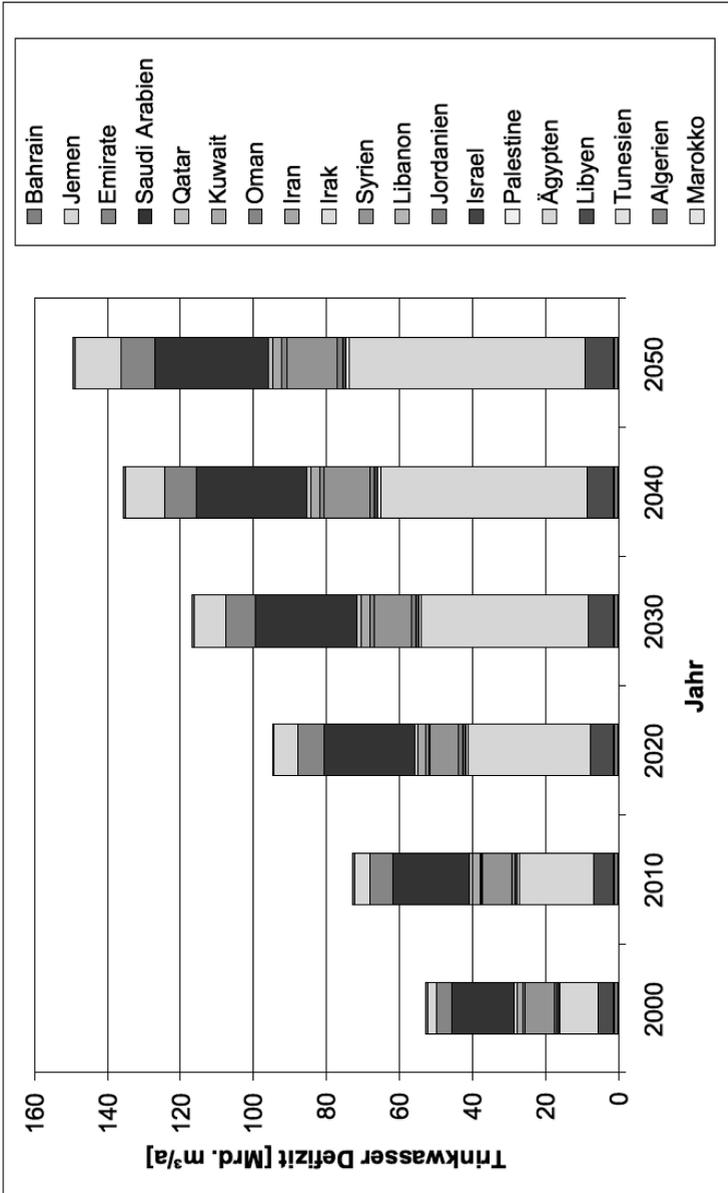


Abbildung 7.3: Trinkwasserdefizit, definiert als die Differenz zwischen Wasserbedarf und erneuerbaren Trinkwasserreserven für jedes der MENA-Länder [4].

Ein weiterer Wachstumsfaktor ist die Wirtschaft, die mit zwei gegensätzlichen Effekten auf den Strom- und Wasserbedarf einwirkt: einerseits steigt der Bedarf, weil neue Dienstleistungen in einer sich entwickelnden Wirtschaft entstehen. Andererseits nimmt die Effizienz von Produktion, Verteilung und Endverbrauch zu, was die Bereitstellung von mehr Dienstleistungen bei konstanter oder sogar reduzierter Energiemenge ermöglicht. In den vergangenen Jahrzehnten ließ sich bei fast allen Industrienationen eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch beobachten. Maßnahmen zur Effizienzsteigerung müssen zunächst einmal finanziert werden können, deshalb muss bereits ein gewisses wirtschaftliches Niveau jenseits des bloßen Existenzbedarfs erreicht sein. Dieses trifft inzwischen auf die meisten EU-MENA-Länder zu. Für die zugrunde liegende Bedarfsuntersuchung siehe [5].

Die Analyse zeigt, dass bis zum Jahr 2050 der Stromverbrauch im Mittleren Osten und in Nordafrika wahrscheinlich auf ca. 3000 TWh/a (Abbildung 7.1) ansteigen, also mit dem derzeitigen Konsum in Europa vergleichbar sein wird. Aufgrund der angenommenen steigenden Effizienzgewinne ergibt das Modell niedrigere Werte hinsichtlich des vorhergesagten Bedarfs als die Mehrzahl existierender Szenarien [6, 7, 8, 9]. Andererseits gibt es auch Szenarien, die von einem noch niedrigeren Bedarf ausgehen [10, 11]. Die daraus resultierende Reduktion des Bedarfs in Europa nach 2040 (wie Abbildung 7.2 zeigt) ist allerdings nur schwer vorhersehbar. Ebenso ist eine Stagnation oder ein leicht anwachsender Verbrauch möglich, da Effizienzgewinne in der Regel für neue energieintensive Dienstleistungen aufgebraucht werden (beispielsweise Elektromobilität oder Wasserstoffantriebe für den Transportsektor). Solche denkbaren Paradigmenwechsel finden hier keine Berücksichtigung.

In der Studie AQUA-CSP wurde eine ähnliche Analyse für den Wassersektor in MENA-Ländern durchgeführt [12]. Die Differenz zwischen verfügbaren, erneuerbaren Trinkwasserressourcen und dem wachsenden Wasserbedarf führt, wie in Abbildung 7.3 dargestellt, zu einem erheblichen Defizit, dem nur unzureichend durch Meerwasserentsalzung mithilfe fossiler Brennstoffe und hauptsächlich mit einer Überausbeutung der Grundwasserressourcen begegnet wird. In vielen Ländern der MENA-Region führt dies bereits zu einem spürbaren Absinken des Grundwasserspiegels, zum Eindringen von Salzwasser in die Grundwasserreservoirs und zu einer schnellen Ausdehnung der Wüsten.

Dem Szenario zufolge tendiert dieses Defizit dazu, von den gegenwärtigen 60 Milliarden  $\text{m}^3$  pro Jahr, die beinahe dem jährlichen Fluss des Nils beim Eintritt in Ägypten entsprechen, auf 150 Milliarden  $\text{m}^3$  im Jahr 2050

anzusteigen. Ägypten, Saudi Arabien, Jemen und Syrien sind die Länder mit den größten Defiziten. Dabei sieht das Szenario bereits eine Verbesserung der Effizienz der Wasserverteilung, Aufbereitung und Wiederverwendung sowie ein verbessertes Wassermanagement, um hohe Qualitätsstandards zu erreichen, vor. Es ist offensichtlich, dass die MENA-Länder in nicht allzu ferner Zukunft vor einem sehr ernstem Problem stehen werden, wenn nicht rechtzeitig Gegenmaßnahmen getroffen werden. Meerwasserentsalzung kann eine zusätzliche Option darstellen, aber nur, wenn die dafür notwendige Energie nachhaltig bereit gestellt werden kann. Angenommen, dass durchschnittlich 3.5 kWh Strom für die Entsalzung von einem Kubikmeter Meerwasser benötigt werden, würde dies einen zusätzlichen Bedarf an fast 550 TWh/Jahr bis 2050 für die Entsalzung bedeuten. Dies entspricht dem aktuellen Strombedarf eines Landes wie Deutschland [12].

#### 7.4 Verfügbare technische Optionen

In der Finanz- und Versicherungsbranche gibt es eine klare Antwort auf die Frage des Risiko-Managements: die Diversifizierung des Anlagenbestands [13]. Diese simple Wahrheit ist im Energiesektor bisher völlig ignoriert worden. Hier wurden Investitionsentscheidungen vorrangig nach den Kriterien „geringste Kosten“ und „bewährte Technologie“ getroffen und das Portfolio war üblicherweise auf fossile Brennstoffe, Wasser- und Kernkraft beschränkt. Diese kurzsichtige Politik ist sowohl für die Konsumenten als auch für die Umwelt schädlich: die Preise aller Arten fossiler Brennstoffe einschliesslich Uran haben sich seit dem Jahr 2000 um ein Vielfaches erhöht und das Verbrennen dieser Stoffe verschmutzt die globale Atmosphäre in einem nicht mehr akzeptablen Maße.

Stromverbraucher und Steuerzahler haben in den meisten Ländern in EU-MENA keine andere Wahl, als die ständig steigenden Kosten fossiler Brennstoffe zu bezahlen, denn durch die Energiepolitik der Vergangenheit wurde versäumt, Alternativen aufzubauen und diese als Teil des Energiemarktes zu etablieren.

Das Ganze wird nicht besser durch die Tatsache, dass fossile und nukleare Energietechnologien auch heute noch etwa 75 % der öffentlichen Zuschüsse im Energiesektor [14] erhalten, eine Zahl, die auf über 90 % ansteigen würde, rechnete man externe Kosten - die in der Regel den Steuerzahler, aber nicht den Stromverbraucher belasten - ebenfalls als versteckte Subvention dazu.

Dabei steht schon heute eine eindrucksvolle Auswahl an erneuerbaren Energietechnologien zur Verfügung [15]. Einige davon erzeugen schwankende Energieflüsse, wie beispielsweise Windkraft- und Photovoltaikanlagen (PV), andere dagegen wie Biomasse, Wasserkraft und konzentrierende solarthermische Kraftwerke (CSP) können sowohl elektrische Spitzen- als auch Grundlast nach Bedarf bereitstellen (Tabelle 7.3).

Das langfristige wirtschaftliche Potenzial erneuerbarer Energiequellen in EU-MENA ist viel größer als der Bedarf, und besonders das Potenzial der Sonnenenergie stellt alle anderen Quellen buchstäblich in den Schatten. Bis zu 250 GWh Strom können von jedem Quadratkilometer ( $\text{km}^2$ ) Wüste mittels solarthermischer Kraftwerke jährlich gewonnen werden. Dies ist 250 Mal mehr als aus Energiepflanzen oder 5 Mal mehr als aus den besten vorhandenen Wind- oder Wasserkraftproduktionsstätten gewonnen werden kann. Jeder Quadratkilometer Land in MENA erhält eine Menge Solarenergie, die 1.5 Millionen Fässern Erdöl entspricht.<sup>1</sup> Ein Feld mit konzentrierenden Solarkollektoren von der Größe des Nasser-Sees in Ägypten (Assuan Damm) wäre in der Lage, eine Energiemenge zu ernten, die der gesamten derzeitigen Erdölproduktion des Mittleren Ostens entspricht.<sup>2</sup>

Außer der Sonne gibt es auch noch andere erneuerbare Energiequellen in EU-MENA: es existiert ein Potenzial von 2000 TWh aus Windenergie und weitere 4000 TWh/Jahr aus geothermalen Quellen, Wasserkraft und Biomasse, deren Nutzung landwirtschaftliche und kommunale Abfälle mit einschließt. Auch Photovoltaik, Wellen- und Gezeitenkraft kommt ein beachtliches Potenzial in der Region zu. Im Gegensatz zu fossilen und nuklearen Brennstoffen sind erneuerbare Energiequellen in der Region im Überfluss vorhanden. Allerdings weist jede dieser erneuerbaren Energiequellen eine spezifische geografische Verteilung auf (Abbildung 7.4). Jedes Land wird deshalb seine individuelle Mischung von Ressourcen anstreben, wobei Wasserkraft, Biomasse und Windenergie die bevorzugten Quellen im Norden und Sonnen- und Windenergie die stärksten Quellen im Süden der EU-MENA-Region sind.

---

<sup>1</sup>Sonneneinstrahlung  $2400 \text{ kWh/m}^2/\text{Jahr}$ ,  $1600 \text{ kWh}$  Wärmewert pro Barrel (Fass).

<sup>2</sup>Die Oberfläche des Nasser-Sees beträgt  $6000 \text{ km}^2$ . Die Erdölproduktion des Mittleren Ostens liegt derzeit bei  $9 \times 10^9$  Barrel/Jahr.

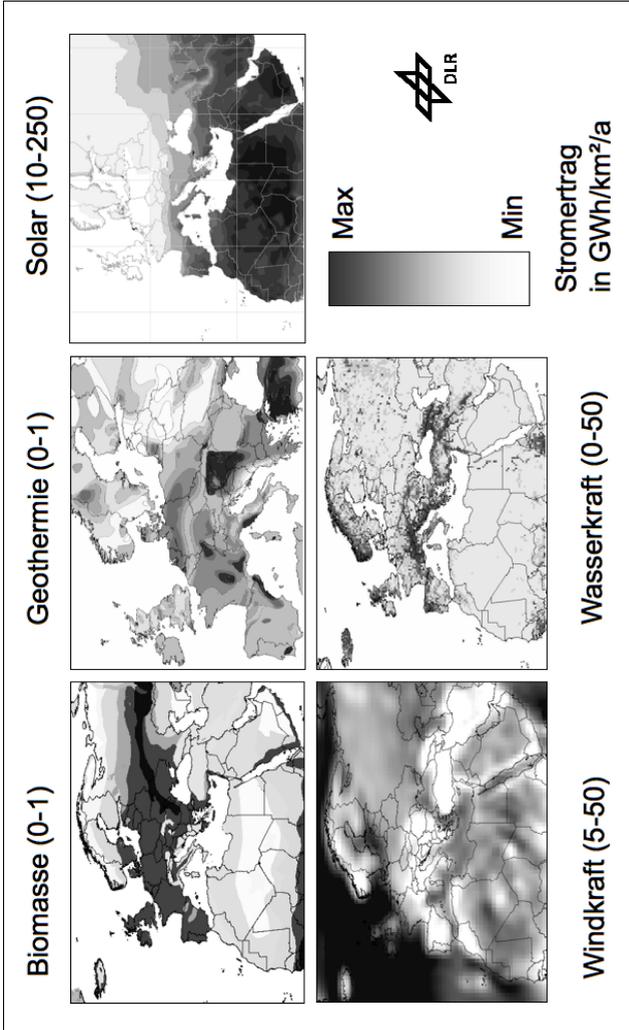


Abbildung 7.4: Geographische Verteilung erneuerbarer Energiequellen für EU-MENA, mit minimalem und maximalem jährlichen Stromertrag (in Klammern), der aus jeweils 1 km<sup>2</sup> Landfläche gewonnen werden kann. Solarenergie beinhaltet sowohl photovoltaische als auch konzentrierende solarthermische Kraftwerke. Die verschiedenen Eigenschaften jeder Ressource sind in Tabelle 7.3 aufgeführt [1].

Tabelle 7.3: Eigenschaften derzeitiger Stromerzeugungstechnologien, \* Beitrag installierter Leistung zu gesicherter Leistung, \*\* mittlere jährliche Auslastung

	Leistungs- klasse	Leistungs- kredit*	Kapazitäts- faktor**	Resource	Anwen- dungen	Bemerkung
<b>Windkraft</b>	1 kW-5 MW	0-30%	15-50%	kinetische Energie des Windes	Strom	fluktuierend, angebotsbestimmt
<b>Photovoltaik</b>	1 W-5 MW	0%	15-25%	direkte und diffuse Strahlung auf eine entsprechend dem Breitengrad geeignete Fläche	Strom	fluktuierend, angebotsbestimmt
<b>Biomasse</b>	1 kW-25 MW	50-90%	40-90%	Biogas aus biolo- gischen Abfällen, feste Biomasse aus Holz und Agrarprodukten	Strom und Wärme	saisonale Schwankungen, gut speicherbar, bedarfsbestimmt
<b>Geothermie, Hot Dry Rock</b>	25-50 MW	90%	40-90%	Wärme aus Gestei- ren in mehreren 1000 Metern Tiefe	Strom und Wärme	keine Schwankungen bedarfsbestimmt
<b>Wasserkraft</b>	1 kW-1000 MW	50-90%	10-90%	kinetische Energie und Druck aus Laufwasser und Speicherseen	Strom	saisonale Schwankungen, gut speicherbar, auch als Pumpspeicher für andere Quellen
<b>Aufwindkraftwerk</b>	100-200 MW	10-70% je nach Speicher	20-70%	Direkte und diffuse Strahlung auf eine horizontale Fläche	Strom	saisonale Schwankungen, gut speicherbar, Grundlast
<b>Solarthermische Kraftwerke</b>	10 kW-200 MW	0-90% je nach Speicherröße und Hybridbetrieb	20-90%	Direkte Strahlung auf eine der Sonne nachgeführte Fläche	Strom und Wärme	solare Schwankungen durch Speicher und Hybridbetrieb aus- gleichbar, bedarfsbestimmt
<b>Gasturbine</b>	0,5-100 MW	90%	10-90%	Erdgas, Heizöl	Strom und Wärme	bedarfsbestimmt
<b>Dampfkraftwerk</b>	5-500 MW	90%	40-90%	Kohle, Braunkohle Erdgas, Heizöl	Strom und Wärme	bedarfsbestimmt
<b>Atomkraftwerk</b>	5>500 MW	90%	90%	Uran	Strom und Wärme	Grundlast

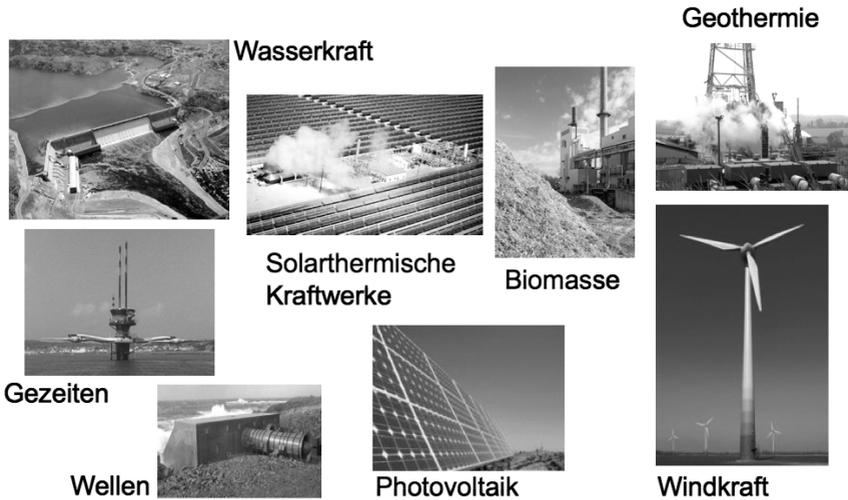


Abbildung 7.5: Portfolio verfügbarer erneuerbarer Technologien zur Stromerzeugung (Quelle: BMU, DLR)

Fossile Energiequellen wie Kohle, Erdöl und Erdgas stellen eine nützliche Ergänzung zu dem Mix aus erneuerbarer Energie dar, da sie perfekt gespeicherte Energieformen sind, die leicht zum Energieausgleich und zur Absicherung der Netzstabilität genutzt werden können. Wenn ihr Verbrauch bis zu dem Punkt gedrosselt werden kann, an dem sie ausschließlich als Reservekapazität dienen, wird voraussichtlich ihr Preisanstieg gebremst und daraus eine nur geringe Belastung für die wirtschaftliche Entwicklung resultieren, und ihr Umwelteinfluss wird minimiert. Darüber hinaus wird ihre Verfügbarkeit um Jahrzehnte, wenn nicht sogar um Jahrhunderte verlängert.

Kernkraftwerke dagegen sind für eine Kombination mit erneuerbaren Energien weniger gut geeignet, weil ihre Erzeugung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht dem ständig schwankenden Bedarf angepasst werden kann, insbesondere bei einem weiteren Ausbau von PV und Windkraft. Weiterhin übersteigen die Stilllegungskosten von Kernkraftwerken die Baukosten [16]. Ein halbes Jahrhundert nach ihrer Markteinführung bestehen noch immer ungelöste Probleme wie die unkontrollierte Verbreitung von Plutonium und die Beseitigung von Atommüll. Die zweite nukleare Option, die Kernfusion, wird aller Voraussicht nach nicht vor 2050 marktfähig sein und ist deshalb für unser Szenario nicht relevant [17].

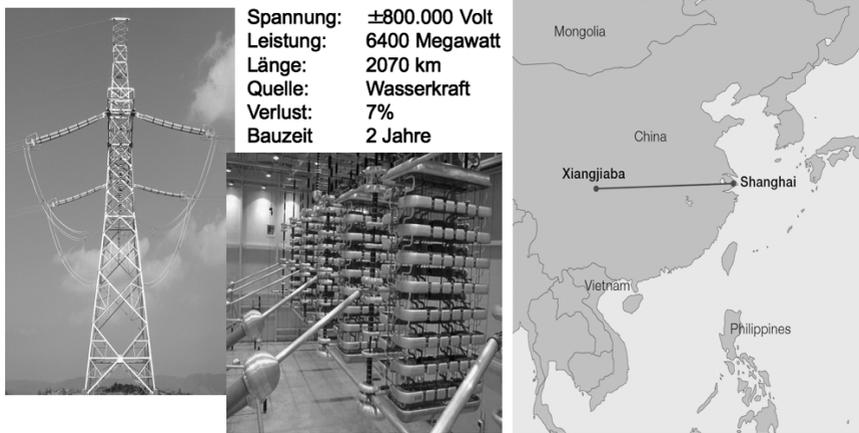


Abbildung 7.6: Ein Beispiel moderner Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung in China (Quelle: ABB)

Einige erneuerbare Energietechnologien sind ebenfalls in der Lage, Grund- und Spitzenlast nach Bedarf zur Verfügung zu stellen. Dazu gehören geothermale Systeme (z.B. das Hot Dry Rock Verfahren), die sich derzeit noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase befinden, große Wasserkraftwerke in Norwegen, Island und den Alpen, die meisten Biomasse-Anlagen und konzentrierende solarthermische Kraftwerke (CSP) in MENA. Letztere nutzen als solar betriebene Dampfkraftwerke die hohe jährliche Sonnenscheindauer in dieser Region, die Möglichkeit solar-thermischer Energiespeicherung für den Nachtbetrieb und die Option der Zufeuerung mit fossilen Brennstoffen oder Biomasse. In Europa sind solarthermische Kraftwerke starken saisonalen Schwankungen unterworfen. Konstante Leistung für die Grundlast kann nur unter Zuhilfenahme eines beträchtlichen Anteils an fossilen Brennstoffen geliefert werden. Aufgrund der stärkeren und über das Jahr gleichmäßigeren Sonnenstrahlung in MENA sind die Kosten konzentrierender Solarenergie dort üblicherweise niedriger und ihre Verfügbarkeit ist besser als in Europa. Deshalb existiert ein bedeutender Markt für Solarstromimporte, die die heimischen europäischen Quellen ergänzen und jederzeit verfügbare (Regel-)Leistung zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitstellen können.

## 7.5 Die Rolle solarthermischer Kraftwerke

Mit Kohle, Uran, Erdöl und Erdgas betriebene Dampf- und Gasturbinen sind die heutigen Garanten für elektrische Netzstabilität, indem sie sowohl Grund- als auch Spitzenlast erzeugen. Allerdings können Turbinen auch mit thermischer Energie aus konzentrierenden Solarkollektoren (Abbildung 7.7) angetrieben werden. Kraftwerke dieses Typs mit 30-80 MW Leistung sind in Kalifornien bereits seit 20 Jahren erfolgreich im Einsatz und neue Kraftwerke werden derzeit in den USA, Spanien und weiteren Ländern errichtet. Bis 2015 könnten weltweit etwa 10 GW Leistung installiert werden, bis 2025 sogar 60-100 GW. Heute, im Jahr 2011, ist weltweit etwa 1 GW in Betrieb. Konzentrierende Solarkollektoren sind effiziente Brennstoffsparer in Dampfkraftwerken. Laut einer aktuellen Studie könnten die heutigen Einspeisetarife für Solarstrom in Spanien von etwa 27 ct/kWh bis 2020 auf unter 10 ct/kWh sinken [18].

Ebenso wie konventionelle Kraftwerke können solarthermische Kraftwerke Grund- und Spitzenlaststrom (sowie auch Regelleistung) liefern, indem sie tagsüber die verfügbare Sonnenenergie nutzen, nachts thermische Energiespeicher verwenden und im Falle längerer Phasen ohne Sonnenschein auf fossile Brennstoffe oder Biomasse als Wärmequelle zurückgreifen. Wie herkömmliche Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, liegt die Verfügbarkeit von solchen Kraftwerken nahezu bei 100 %, allerdings bei deutlich niedrigerem Brennstoffverbrauch. Zwei CSP Kraftwerke mit thermischen Energiespeichern für zusätzliche acht Stunden Betriebszeit bei voller Last werden seit einigen Jahren in der spanischen Sierra Nevada bei Guadix betrieben. Diese Anlagen (ANDASOL 1 & 2) mit einer Kapazität von jeweils 50 MW haben einen jährlichen Solaranteil der Stromerzeugung von 85 %, der Rest wird mit Erdgas erzeugt

Ein weiteres Merkmal zeichnet solarthermische Kraftwerke aus: die Möglichkeit der kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme, um die höchstmögliche Effizienz für die Energieumwandlung zu erreichen. Neben Strom können solche Anlagen auch Dampf für Absorptionskältemaschinen (AC), industrielle Prozesswärme oder thermische Meerwasserentsalzung (MED) liefern. Eine Machbarkeitsstudie für solche Anlagen in fünf Ländern der Mittelmeerregion wurde im Mai 2010 erfolgreich abgeschlossen [19].

## 7.6 Nachhaltige Energie- und Wasserversorgung für EU-MENA

Anhand der in Tabelle 7.1 formulierten Nachhaltigkeitskriterien und unter Berücksichtigung zusätzlicher technischer, sozialer und wirtschaftlicher

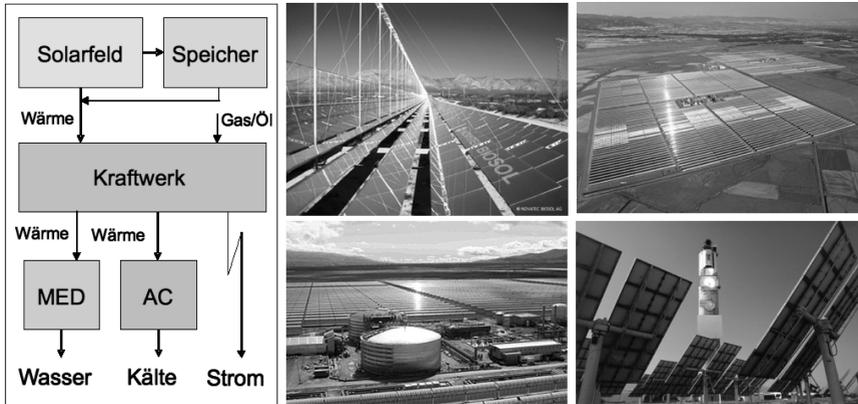


Abbildung 7.7: Links: Konfiguration eines konzentrierenden Solarkraftwerks mit Kraft-Wärme-Kopplung für Kälteerzeugung (absorption chiller AC) und Meerwasserentsalzung (multi-effect desalination MED). Mitte oben: Linear Fresnel Kollektorfeld der Firma Novatec bei Murcia, Spanien. Mitte unten: Wärmespeicher und Parabolrinnenkollektoren im andalusischen Solarkraftwerk ANDASOL 1, Rechts oben: Solarturmkraftwerk CESA 1 in Almeria. Rechts unten: ANDASOL 1 und 2 (Quellen: Novatec, Cobra S.A., DLR).

Rahmenbedingungen, die an anderer Stelle bereits beschrieben wurden [1, 2], wurde vom DLR ein Szenario für die Energieerzeugung für 50 Länder der MENA-Region bis zum Jahr 2050 entwickelt. Mit Ausnahme von Windenergie und Wasserkraft, die heute bereits beide als voll etabliert gelten können, werden erneuerbare Energieformen kaum vor dem Jahr 2020 im Strommix sichtbar werden (Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9). Gleichzeitig wird das Auslaufen der Nutzung von Kernenergie in vielen europäischen Ländern und der aus Umweltschutzgründen stagnierende Verbrauch von Stein- und Braunkohle einen zunehmenden Druck auf die Erdgasvorkommen ausüben, deren Verbrauch steigen wird und auf deren Funktion zur Energiegewinnung verstärkt zurückgegriffen werden wird.

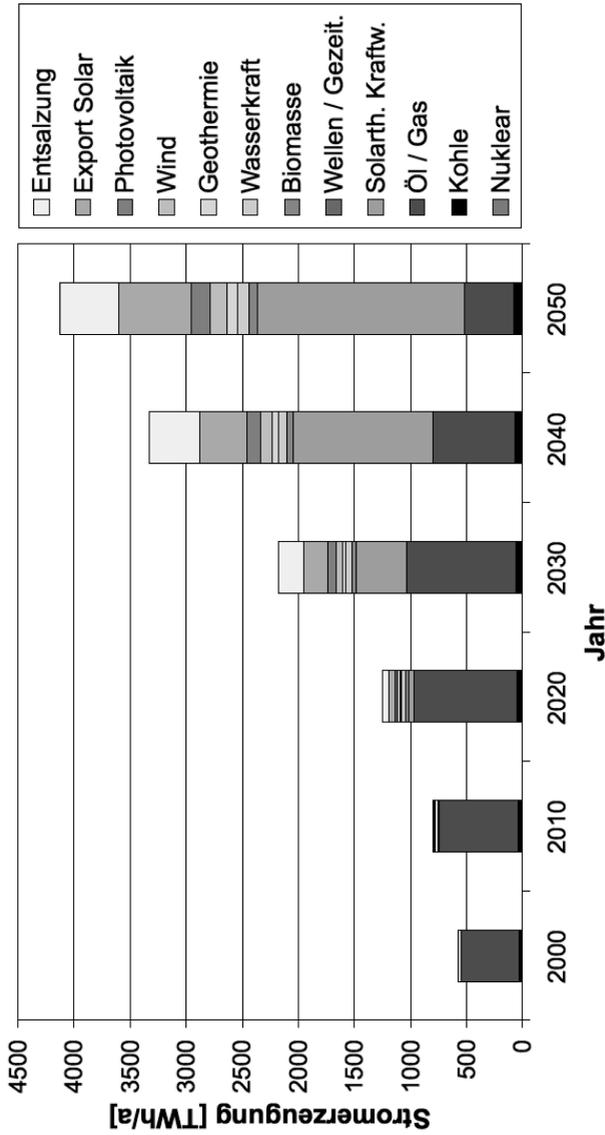


Abbildung 7.8: Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer und fossiler Energiequellen in MENA zur Deckung des wachsenden Energiebedarfs unter Berücksichtigung von Solarstromexporten nach Europa und dem zusätzlichen Strombedarf für die Meerwasserentsalzung in der Region.

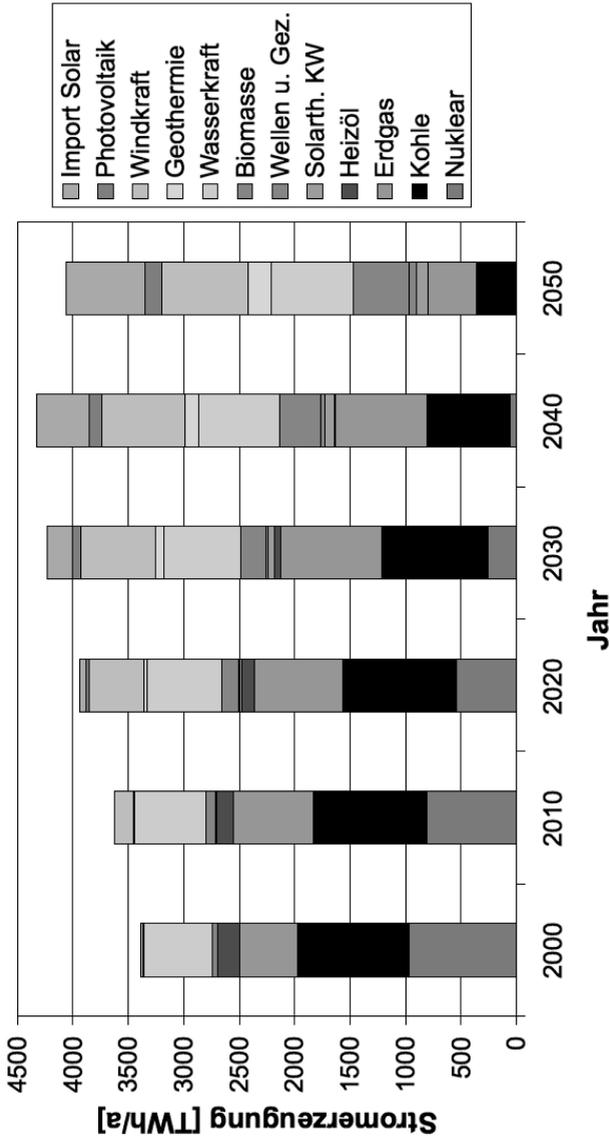


Abbildung 7.9: Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer, nuklearer und fossiler Energiequellen in Europa zur Deckung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung von Solarstromimporten aus MENA.

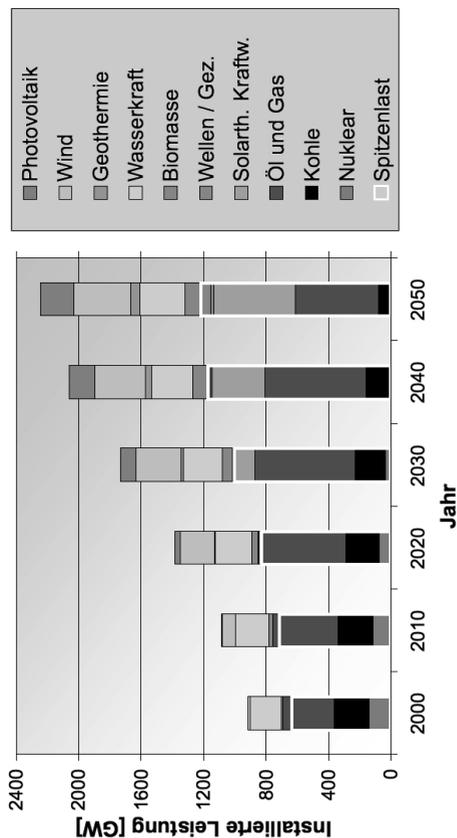


Abbildung 7.10: Installierte Leistung im Vergleich im Vergleich zur kumulierten Spitzenlast (transparentes Feld mit weißem Rahmen) für die gesamte Region EU-MENA. Die gesicherte, jederzeit verfügbare Leistung des Kraftwerksparcs wurde für jedes einzelne Land mit Hilfe der in Tabelle 7.3 angegebenen Leistungskredite der verschiedenen Technologien so kalkuliert, dass sie jederzeit die Spitzenlast mit einer zusätzlichen Reserve von 25 % abdecken kann. Im Jahr 2050 werden 68 % der installierten Leistung solarthermischer Kraftwerke für den lokalen Strombedarf, 19 % für den Solarstrom-export und 13 % für die Meerwasserentsalzung genutzt werden. Die hier gezeigte installierte Leistung liefert insgesamt die in Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 dargestellten Strommengen und sichert die Netzstabilität zu jeder Zeit.

Bis 2020 werden erneuerbare Energieformen wie Wind und Photovoltaik vor allem zur Reduzierung des Brennstoffverbrauchs, aber nur wenig zur Verminderung der notwendigen konventionellen Kraftwerke für Regelleistung beitragen. Aufgrund des wachsenden Bedarfs und der Ablösung der Kernkraft wird der Verbrauch fossiler Brennstoffe vor 2020 nicht wesentlich reduziert werden können. Heizöl für die Stromerzeugung wird bis 2030 aus Kostengründen weitgehend verschwunden sein, gefolgt von Kernkraft im letzten Jahrzehnt des Szenarios, die dann nicht mehr gebraucht wird. Der Verbrauch an Erdgas und Kohle wird deshalb mittelfristig bis 2030 ansteigen, aber danach bis 2050 auf ein kompatibles und finanziell verträgliches Maß reduziert werden können. Auf lange Sicht ist nicht auszuschließen, dass neue Verbrauchertypen wie Elektroautos den Energiebedarf weiter ansteigen lassen und demzufolge eine stärkere Ausbeutung erneuerbarer Energien notwendig wird. Ausreichend Potenziale sind dafür in jedem Fall vorhanden.

Der Strommix im Jahr 2000 stammte aus nur fünf Quellen, von denen die meisten begrenzt sind, während die Mischung im Jahr 2050 auf zehn Energiequellen beruhen wird, die in der Mehrzahl erneuerbar sind. Aus diesem Grund erfüllt das hier vorgestellte Szenario die von der Europäischen Kommission deklarierte „European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy“, im gleichnamigen Green Paper und Hintergrunddokument, das auf eine größere Diversifizierung und Sicherheit des europäischen Energiebestands abzielt [7, 8].

Eine wesentliche Bedingung für die Gestaltung einer nachhaltigen Elektrizitätsversorgung ist die Bereitstellung gesicherter Leistung nach Bedarf mit einer Reserve in Höhe von ca. 25 % zusätzlich zur erwarteten Spitzenlast (Abbildung 7.10). Vor dem Beginn einer signifikanten Solarstromübertragung im Jahr 2020 kann dies nur gewährleistet werden, indem die Kapazität und der Brennstoffkonsum von Spitzenlastkraftwerken mittels Erdgas - und zu einem späteren Zeitpunkt auf Basis von Kohlevergasung - erweitert wird. Damit entlasten Solarstromimporte den Verbrauch fossiler Energieträger, stellen aber keine Konkurrenz zu heimischer Windkraft- und PV-Nutzung dar.

In Europa verdoppelt sich im Szenario der Erdgasverbrauch bezogen auf das Anfangsjahr 2000, wird aber dann wieder auf das ursprüngliche Niveau sinken, nachdem im Jahr 2020 ein wachsender Anteil an CSP Übertragung aus den MENA-Ländern neben geothermischer Energie und Wasserkraft aus Skandinavien via Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ) eingeführt wird. Europäische erneuerbare Energiequellen, die sicher abrufbare Leistung bereitstellen könnten, sind mit Blick auf ihr Po-

tenzial sehr begrenzt. Deshalb wird die Solarstrom-Übertragung von MENA nach Europa unabdingbar sein, um sowohl die Kapazität und den Brennstoffkonsum von Erdgas betriebenen Spitzenlastkraftwerken durch jederzeit lückenlos abrufbare, erneuerbare Leistung zu ersetzen.

In den MENA-Ländern stellen konzentrierende thermische Solarkraftwerke die einzige erneuerbare Quelle dar, die tatsächlich in der Lage ist, den schnell anwachsenden Stromkonsum zu befriedigen, da sie sowohl Grundlaststrom als auch Regelleistung nach Bedarf liefern können. Speicherwerkkraft, um das fluktuierende Wind- und PV-Stromangebot auszugleichen, ist praktisch nicht vorhanden. Nach unserem Szenario werden im Jahr 2050 fossile Energiequellen lediglich als Notfallreserve genutzt werden, zum grössten Teil auch in solarthermischen Kraftwerken. Dies wird den Verbrauch von Brennstoffen auf ein verträgliches Maß reduzieren und die andernfalls rapide steigenden Stromerzeugungskosten senken. Fossile Brennstoffe werden weiterhin genutzt werden, um jederzeit gesicherte Leistung zu garantieren, während erneuerbare Energien deren Verbrauch stark reduzieren werden.

Zur Ergänzung des erneuerbaren Strommixes wird eine effiziente Backup-Infrastruktur benötigt: Einerseits muss sie eine gesicherte bedarfsorientierte Kapazität durch schnell reagierende, mit Erdgas befeuerte Spitzenlastkraftwerke bereitstellen. Andererseits muss eine effiziente Netzinfrastruktur bereitstehen, die die Übertragung erneuerbaren Stroms von den am besten geeigneten Produktionsstätten zu den Hauptverbrauchszentren erlaubt. Eine mögliche Lösung ist die Kombination von HGÜ-Leitungen und dem konventionellen Wechselspannungsnetz.

Im Niederspannungsbereich werden auch dezentralisierte Strukturen an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise der Betrieb von PV, Wind-, Mikro-Gasturbinen und Blockheizkraftwerken so kombiniert wird, als wären sie ein großes, virtuelles Kraftwerk. Eine solche Netzinfrastruktur wird nicht durch die Nutzung von erneuerbaren Energieformen allein begründet sein. Vielmehr wird diese Entwicklung wahrscheinlich ohnehin stattfinden, um das wachsende europäische Netz zu stabilisieren, um größere Versorgungssicherheit zu erhalten und um den Wettbewerb zu stärken [20, 21].

Bis 2050 werden Übertragungsleitungen mit einer Kapazität von jeweils 2,5-5,0 GW rund 700 TWh Solarenergie pro Jahr von 20 bis 40 verschiedenen Orten im Mittleren Osten und Nordafrika zu den Hauptverbrauchszentren in Europa liefern (Abbildung 7.11 und Tabelle 7.4).

HGÜ steht seit mehreren Jahrzehnten als ausgereifte Technologie zur Verfügung und gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Stabilisierung von großflächigen Stromnetzen, insbesondere wenn mehr fluktuierende Res-

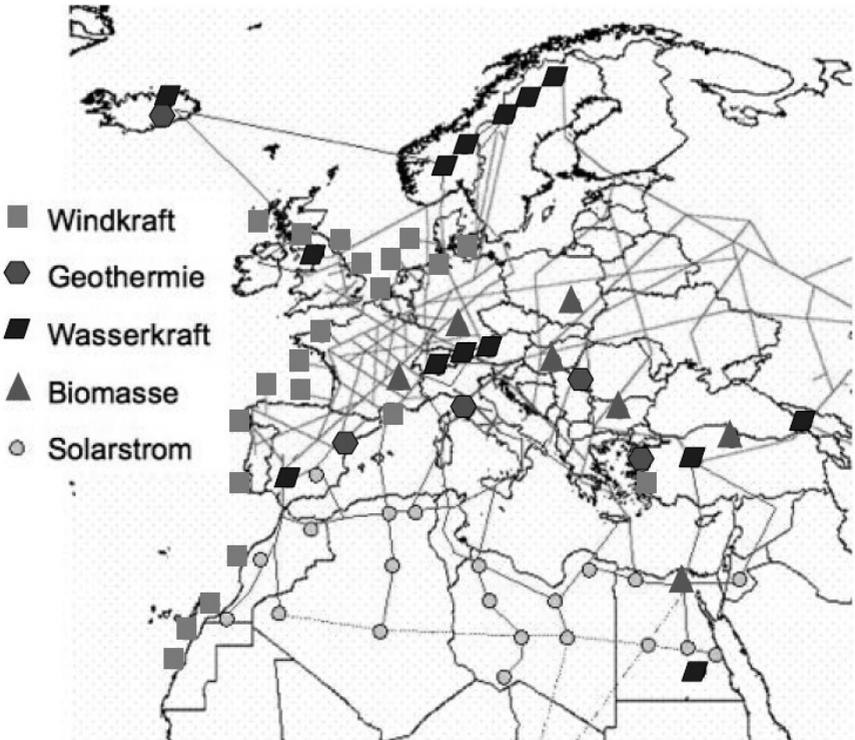


Abbildung 7.11: Schematische Darstellung eines möglichen zukünftigen Verbundes mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen in der Region EU-MENA. Solche „Stromautobahnen“ könnten das konventionelle Wechselstromnetz ergänzen, um einen effizienten Ferntransport erneuerbarer Energie von den besten Produktionsstandorten zu den Verbrauchszentren zu ermöglichen (nach [20]).

Tabelle 7.4: Indikatoren für den EU-MENA Solarstromexport aus solarthermischen Kraftwerken (CSP) via Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) zwischen 2020 und 2050 nach dem TRANS-CSP Szenario. Im Jahr 2050 werden 20 bis 40 HGÜ-Leitungen mit einer Leistung von je 2,5–5,0 GW insgesamt etwa 700 TWh Strom von MENA nach Europa übertragen und dort in den Ballungszentren einspeisen. Die Tabelle zeigt auch die kumulierte Investition bis 2050 für Leitungen und Kraftwerke sowie die gesamten Stromkosten inkl. Übertragung in konstantem Geldwert des Jahres 2000 (zur Abschätzung heutiger oder zukünftiger nominaler Kosten - zum heutigen oder zukünftigen Geldwert - muss die Inflation ab dem Jahr 2000 dazugerechnet werden). Stromkosten wurden auf der Basis 5 % Zinssatz und 40 Jahre Lebensdauer für CSP bzw. 80 Jahre für HGÜ-Leitungen berechnet [2].

<i>Jahr</i>		<i>2020</i>	<i>2030</i>	<i>2040</i>	<i>2050</i>
<i>Anzahl × Leistung</i> <i>GW</i>		$2 \times 5$	$8 \times 5$	$14 \times 5$	$20 \times 5$
<i>Transfer TWh/a</i>		60	230	470	700
<i>Mittlere Auslastung</i>		0,60	0,67	0,75	0,80
<i>Umsatz Mrd. €/a</i>		3,8	12,5	24,0	35,0
<i>Landfläche</i>	<i>CSP</i>	$15 \times 15$	$30 \times 30$	$40 \times 40$	$50 \times 50$
<i>km × km</i>	<i>HGÜ</i>	$3100 \times 0,1$	$3600 \times 0,4$	$3600 \times 0,7$	$3600 \times 1,0$
<i>Investition</i>	<i>CSP</i>	42	134	245	350
<i>Mrd. €</i>	<i>HGÜ</i>	5	16	31	45
<i>Stromkosten</i>	<i>CSP</i>	0,050	0,045	0,040	0,040
<i>€/kWh</i>	<i>HGÜ</i>	0,014	0,010	0,010	0,010

sources eingebunden werden. HGÜ tragen dazu bei, Ausgleichseffekte zwischen entfernten und lokalen Energiequellen zu erhöhen, und gegebenenfalls Betriebsausfälle großer Kraftwerke durch Backup-Kapazitäten aus der Ferne abzufangen.

Als Nebeneffekt dieser Entwicklung wird Solarstrom aus MENA-Ländern eine attraktive Option zur Erweiterung des europäischen Stromerzeugungs-Portfolios werden. Aufgrund der Abundanz und der saisonalen Konstanz der Solarenergie aus den Wüsten wird sie billiger und leichter erhältlich sein als in Europa erzeugte Solarenergie. In einer zukünftigen Allianz für erneuerbare Energien zwischen Europa und MENA werden Solar- und Windenergie, Wasserkraft, geothermische Energie sowie Biomasse an den Orten genutzt, wo sie am reichhaltigsten vorliegen.

Diese Energie wird über zum Teil große Entfernungen per HGÜ durch ganz Europa und MENA übertragen und dann in das konventionelle AC-Netz eingespeist, von wo es an die Verbraucher verteilt wird. In Analogie zum Autobahnnetz wird ein zukünftiges HGÜ-Netz eine geringe Anzahl von Einlässen und Auslässen haben, die es mit dem konventionellen Wechselspannungsnetz verbinden, weil es vorrangig der Fernenergieübertragung dient, während das Wechselspannungsnetz mit dem Straßensystem auf dem Land und in Stadtgebieten vergleichbar ist und wie bisher die Aufgabe der lokalen Verteilung der Energie übernimmt. Der Verlust der in MENA generierten Solarenergie durch HGÜ wird über eine Entfernung von 3000 km etwa 10 % betragen.

Im Jahr 2050 könnten 20 bis 40 Stromleitungen mit einer Kapazität von jeweils 2500-5000 MW etwa 15 % der Europäischen Energie als saubere Energie aus der Wüste liefern. Der Wert dieser Importe gründet sich auf niedrige Produktionskosten von langfristig ca. 5 ct/kWh (ohne weitere potenzielle Kostenreduzierungen über CO<sub>2</sub>-Handel zu berücksichtigen) und eine hohe Flexibilität hinsichtlich Grund-, Regel- und Spitzenlastbetrieb [22, 23].

Es existiert die weit verbreitete Überzeugung, dass für jede Windfarm oder PV-Anlage ein mit fossilen Brennstoffen betriebenes Backup-Kraftwerk installiert werden muss. Im Gegensatz dazu zeigte ein Modell stündlicher Zeitverläufe des Energieversorgungssystems ausgewählter Länder gemäß unserem Szenario, dass sogar ohne zusätzliche Stromspeicherkapazitäten die existierende Regelleistung der Spitzenlastkraftwerke zum Ausgleich von Bedarfsfluktuationen ausreicht. Dies gilt, solange die fluktuierende Leistung kleiner bleibt als die installierte Leistung vorhandener Spitzenlastkraftwerke, was in unserem Szenario der Fall ist.

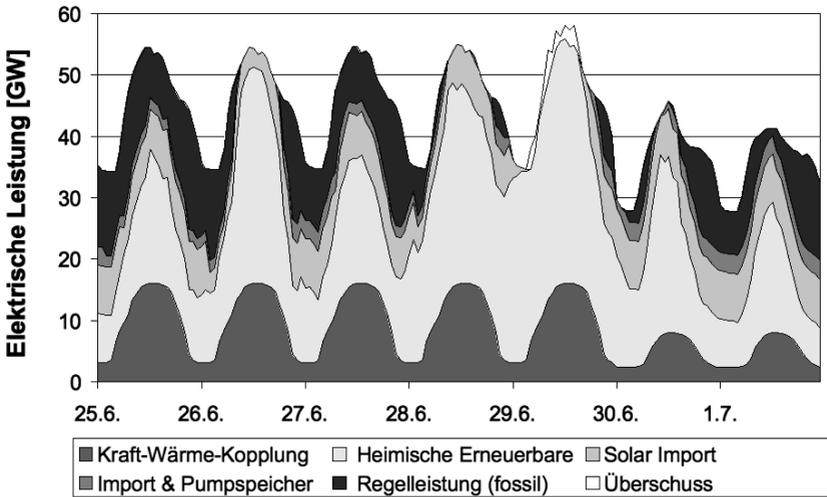


Abbildung 7.12: Ausschnitt aus einer stündlichen Modellierung der Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2050 mit hohen Anteilen erneuerbarer Energie [24].

Tatsächlich wird sich der Bedarf an konventionellen Grundlastkraftwerken, die eine konstante Ausgangsleistung erzeugen, als Konsequenz des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien Schritt für Schritt verringern (Abbildung 7.12). Grundlaststrom wird durch Kraft-Wärme-Kopplung, die Brennstoffe auf fossiler und Biomasse-Basis nutzt, durch Laufwasserkraft und durch Windkraft- und Photovoltaikanlagen gewonnen. Regelleistung wird aus besser speicherbaren Quellen wie Speicherwasserkraft, Biomasse oder geothermischer Energie gewonnen. Diese Kombination von Energiequellen wird den täglichen Lastverlauf nicht vollständig abdecken, sich ihm aber stark annähern. Die verbleibende Spitzenlastkapazität (oder besser gesagt Regellast) wird durch Pumpspeicherkraftwerke, Speicherwasserkraft, solarthermische Kraftwerke und auf fossilen Brennstoffen basierenden Spitzenlastkraftwerken bereitgestellt. Zusätzlich wird ein bedarfsseitig verbessertes Lastmanagement zunehmend dafür genutzt werden, die Nutzung von Pumpspeicherkapazität und fossilen Brennstoffen für Spitzenlast zu minimieren, deren Betrag verglichen mit heute in etwa gleich bleiben wird [24].

Die im Jahr 2050 noch verbleibenden, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kapazitäten werden ausschließlich Ausgleichsaufgaben und der kombinierten Strom- und Wärmegenerierung dienen. Dies entspricht der Strategie, diese wertvollen, perfekt gespeicherten Energiereserven ausschließlich für die Zwecke zu nutzen, für die sie am besten geeignet sind, anstelle sie für den Alltagsgebrauch aufzuzehren. Grundlastkraftwerke mit konstanter Ausgangsleistung, die durch Kernspaltung, Kernfusion oder Braunkohle angetrieben werden, sind für ein solches System nicht passfähig, weil sie nicht in der Lage sind, die Lücke zwischen dem teilweise fluktuierenden Angebot aus erneuerbaren Energiequellen und dem ebenso fluktuierenden Bedarf zuverlässig zu schließen. Tatsächlich werden mit Erdgas betriebene Kraftwerke die bevorzugte Wahl für diese Zwecke sein. Langfristig werden nach 2050 erneuerbare Quellen in Verbindung mit fortgeschrittenem Speicher- und Lastmanagement und in enger Koordinierung mit anderen Energiesektoren wie Wärme- und Kälteerzeugung sowie dem Transport- und Mobilitätssektor letztendlich auch den verbleibenden Strombedarf übernehmen.

## 7.7 Kostengünstiger Strom aus erneuerbarer Energie

Bei einem weltweit zügigen Ausbau von solarthermischen Kraftwerken kann eine Reduzierung der Solarstromkosten aufgrund der Rationalisierungseffekte mit einer Entwicklungsrate von ca. 85-90 %<sup>3</sup> erreicht werden [26]. Ein solches Kraftwerk kann heute beispielsweise in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer Strom zu ca. 0,15-0,20 €/kWh erzeugen (Abbildung 7.13), wenn man von einer Verzinsung des Kapitals von 6,5 %/a und einer Lebensdauer von 25 Jahren ausgeht. Bei einer Installation von weltweit 10.000 MW würden die Kosten in Folge der Lerneffekte auf ungefähr 0,08-0,10 €/kWh fallen, und auf bis zu 0,04-0,06 €/kWh nach Installation einer 100.000 MW-Kapazität.<sup>4</sup> Eine solche Kostenreduzierung könnte bei einer angenommenen globalen Expansion von heute 1000 MW auf etwa 40.000 MW bis zum Jahr 2020 und ungefähr 240.000 MW bis 2030 erfolgen, inklusive der Kapazitäten für die Meerwasserentsalzung [1, 2, 12]. Aktuelle Szenarien gehen sogar von deutlich stärkerem Wachstum solarthermischer

---

<sup>3</sup>Eine Lernrate von 90 % bedeutet, dass die spezifische Investition sich immer dann um 10 % reduziert, wenn die weltweit installierte Kapazität der Sonnenkollektoren verdoppelt wird [25, 26].

<sup>4</sup>Diese Kosten basieren auf einem ausschließlich solarbetriebenen Modus und wären im Hybridmodus aufgrund der besseren Tilgungsraten des Kraftwerksblocks geringfügig niedriger. Alle Kosten in konstantem (realem) Geldwert (€) des Jahres 2000 ohne Inflation.

Kraftwerke aus [27, 28]. Langfristig könnten weltweit insgesamt 500.000 – 1.000.000 MW bis zum Jahr 2050 installiert werden. Alle Kosten sind in konstantem Geldwert des Jahres 2000 (ohne Inflation) angegeben.

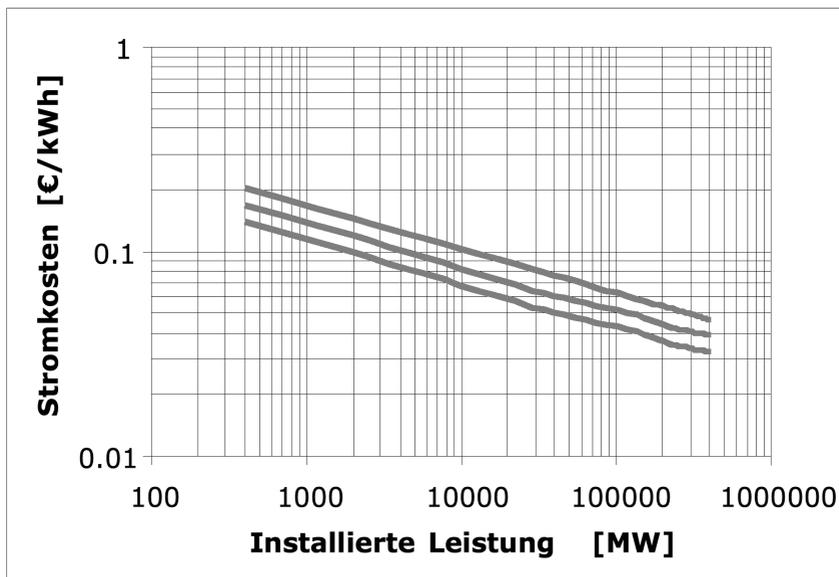


Abbildung 7.13: Voraussichtliche Entwicklung der Stromkosten solarthermischer Kraftwerke unter der Annahme eines kontinuierlichen weltweiten Ausbaus für eine Einstrahlung von 2000, 2400 und 2800 kWh/m<sup>2</sup>/a (konstanter Geldwert in € des Jahres 2000, 25 Jahre Lebensdauer, Diskontrate 6,5 %/a, vergl. [26, 2]).

Alle erneuerbaren Stromquellen zeichnen sich durch ähnliche Erfahrungskurven aus und werden mit zunehmendem Ausbau kostengünstiger. Im Gegensatz zu den meisten erneuerbaren Energiequellen, die Ausbaugrenzen hinsichtlich ihrer installierbaren Leistung aufweisen, übersteigt das technisch verfügbare Sonnenenergiepotenzial in den MENA-Ländern den projizierten zukünftigen Strombedarf um etwa ein Hundertfaches.

Außerdem werden die Kosten der sauberen Energie aus den Wüsten aufgrund der besseren Sonnenstrahlung inklusive der Übertragungskosten niedriger sein als Sonnenenergie, die aus demselben in Europa verwendeten

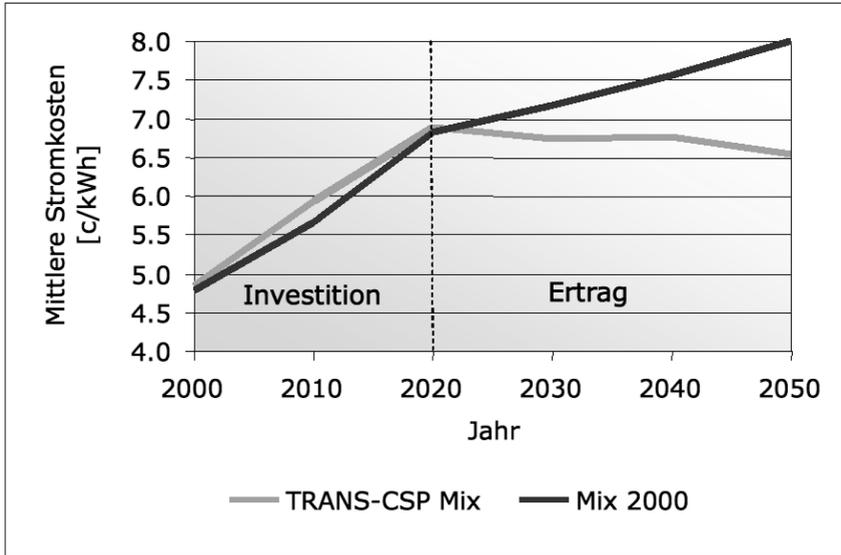


Abbildung 7.14: Kosten im Spanischen Strommix entsprechend dem TRANS-CSP Szenario im Vergleich zu einer Beibehaltung des Strommixes des Jahres 2000 [2]. Alle Kostenangaben in konstantem Geldwert (€) des Jahres 2000.

Kraftwerkstyp stammt. Nimmt man den spanischen Strommix als Beispiel, wie in [2] beschrieben, dann zeigt ein Szenario aus einer Mischung aus heimischen erneuerbaren Energien, Solarenergie aus Nordafrika und fossilen Brennstoffen mittelfristig stabile und sogar leicht sinkende Stromkosten. Geht dagegen alles wie gewohnt weiter, wird dies zu sich immer höher schraubenden Energiekosten führen (Abbildung 7.14), wie es seit 2000 der Fall ist. Im TRANS-CSP Szenario wird die Expansion erneuerbarer Energien in Marktnischen wie dem Deutschen oder dem Spanischen Erneuerbaren Energiegesetz bis etwa 2020 stattfinden und zu vorübergehend leicht erhöhten Kosten führen. Während dieser Zeit wird der Anteil erneuerbarer Energien ansteigen, während die Kosten für Strom erneuerbarer Herkunft sinken werden.

Sobald Kostengleichheit mit fossilen Energieträgern erreicht ist, werden erneuerbare Kapazitäten schneller anwachsen und damit weitere Steigerungen der nationalen Stromkosten vermeiden. Auf diese Weise können

die mittleren Stromkosten konstant gehalten bzw. in manchen Fällen sogar wieder auf ein niedrigeres Niveau gesenkt werden, indem der Anteil erneuerbarer Energiequellen erhöht wird. Dieses Konzept ist in allen EU-MENA-Ländern realisierbar.

Wie der unaufhaltsame Anstieg der Energiekosten deutlich zeigt, ist eine Einführung erneuerbarer Energiequellen im großen Umfang die einzige sichtbare Lösung, wenn man eine weitere Kostenanhebung auf lange Sicht im Energiesektor vermeiden und mittelfristig zu einem relativ niedrigen Stromkostenniveau zurückkehren will. Dies stimmt mit der Verpflichtung der meisten Energieversorger überein, ihren Kunden den kostengünstigsten Strom zu liefern. Solarstromimporte aus den Wüsten sind ein Schlüsselement einer solchen Strategie.

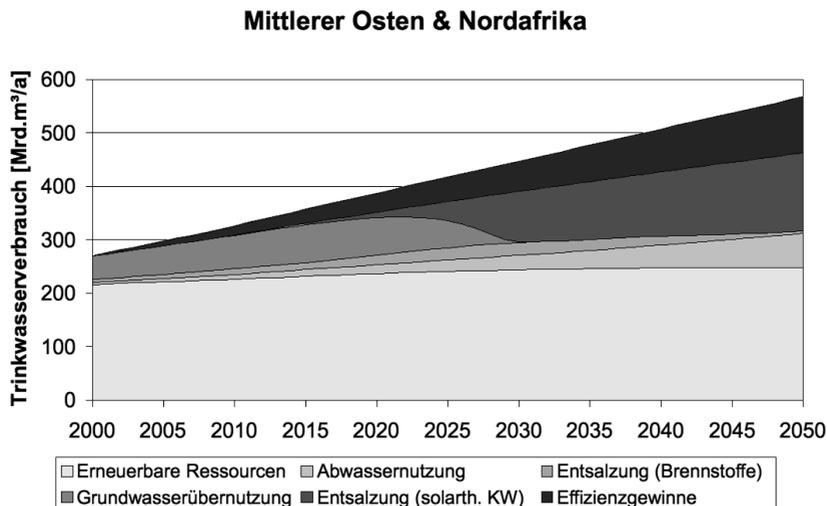


Abbildung 7.15: Szenario der Wasserversorgung in MENA bis zum Jahr 2050. Quelle: [12]

Eine finanziell tragbare und nachhaltige Energieressource wird darüber hinaus für einen noch existenzielleren Rohstoff benötigt: durch Meerwasserentsalzung gewonnenes Trinkwasser. Solarthermische Kraftwerke und andere erneuerbaren Energien können auch hier eine Lösung bieten [29]. Die AQUA-CSP Studie zeigt das Potential von CSP für die Meerwasserentsalzung in der MENA-Region und beschreibt die verfügbaren techni-

schen Optionen, die von solarbetriebener Membranen-Entsalzung bis zur kombinierten Erzeugung von Solarstrom und Wärme für die thermische Mehrstufenentsalzung reichen [12].

Tatsächlich gibt es keinen anderen Weg, um eine ernstzunehmende Wasserkrise in der MENA-Region zu verhindern, die bisher nur durch eine ansteigende Übernutzung von Grundwasserreserven hinausgeschoben wird. Es müssen alle vorhandenen Optionen aktiviert werden, mit dem Ziel eines besseren Wassermanagements durch eine höhere Effizienz bei der Wasserverteilung und beim Endverbrauch, der Abwasseraufbereitung und -wiederverwertung sowie der Meerwasserentsalzung basierend auf erneuerbaren Energiequellen (Abbildung 7.15).

## 7.8 Eine Alternative zu Klimawandel und Kernenergie

Durch die Implementierung unseres Szenarios können die Kohlenstoffemissionen auf Werte reduziert werden, die mit dem globalen Ziel vereinbar sind, den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre soweit zu reduzieren, dass eine globale Erwärmung im Bereich von 1,5-3,9 °C gehalten werden kann [30]. Ausgehend von 1790 Mio. Tonnen Kohlendioxid pro Jahr im Jahr 2000, können die Emissionen auf 690 Mt/a in 2050 verringert werden, anstatt auf 3700 Mt/a anzuwachsen (Abbildung 7.16). Die bis 2050 erreichbare Pro-Kopf-Emissionsmenge von 0,58 t/cap/a im Stromsektor ist akzeptabel mit Blick auf die vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) empfohlene Gesamtemissionsmenge von 1-1,5 t/cap/a [31]. Weitere Einsparungen nach 2050 sind erreichbar. Auch andere Schadstoffe werden auf diese Weise reduziert, ohne auf eine Erweiterung der Kernenergie und die damit zusammenhängenden Risiken zurückgreifen zu müssen.

Kohlenstoffabspaltung und -speicherung (CCS) betrachten wir in unserer Studie als Ergänzung, aber nicht als Alternative zu erneuerbaren Energien, da sie die Effizienz von Kraftwerken vermindert und dadurch den Verbrauch von fossilen Brennstoffen um bis zu 30 % beschleunigt. Aufgrund der Tatsache, dass die Kosten der Kohlenstoffabspaltung stets zusätzlich zu den Kosten fossiler Brennstoffe entstehen, führt CCS zu einem früheren Erreichen des Kostendeckungspunktes mit erneuerbaren Energien und zu deren schnellerer Markteinführung.

Die Fläche, die für die gesamte Infrastruktur erneuerbarer Energien unter Einbeziehung der vorgeschlagenen HGÜ-Leitungen im Zeitraum bis 2050 benötigt wird, umfasst etwa 1 % der gesamten Landfläche der EU-MENA-Region. Dies ist mit der derzeit für die Transport- und Ver-

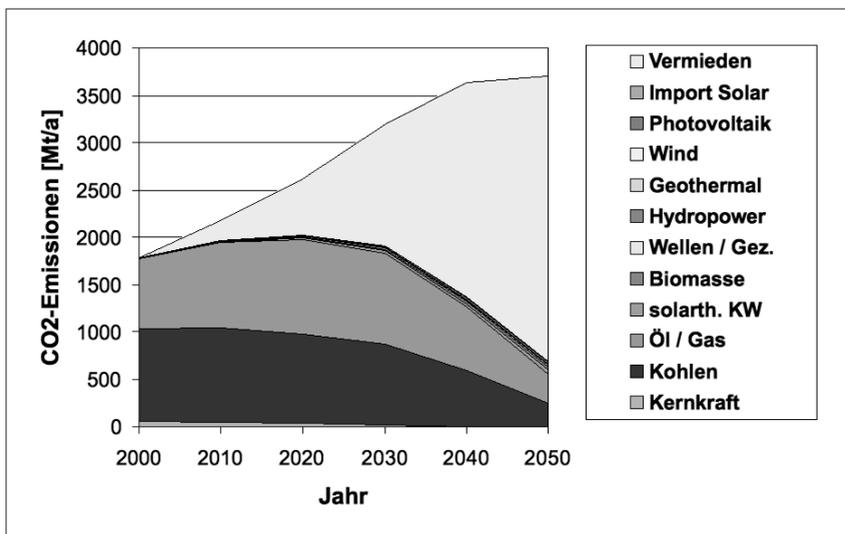


Abbildung 7.16: CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Stromerzeugung in Millionen Tonnen pro Jahr für alle untersuchten Länder in EU-MENA sowie die durch die Implementierung der hier vorgestellten Szenarien vermeidbaren Emissionen (Vergleichsfall: Mix des Jahres 2000 wird beibehalten, wobei die Emissionen proportional zum steigenden Verbrauch anwachsen).

kehrinfrastruktur genutzten Landfläche in Europa vergleichbar. Unter Verwendung eines geographischen Informationssystems (GIS) wurden drei Beispiele von HGÜ-Leitungen anhand einer Lebenszyklusanalyse [32] analysiert, die sehr gut geeignete Standorte für die Solarstromerzeugung in MENA mit drei bedeutenden europäischen Verbrauchszentren verbinden. Das GIS wurde so programmiert, dass die Kosten, die Umweltbeeinträchtigungen und die Sichtbarkeit der Stromleitungen minimiert wurden, und lieferte Ergebnisse, die aus unserer Sicht innerhalb eines ökonomisch und ökologisch akzeptablen Bereichs liegen. Üblicherweise sind die Auswirkungen durch HGÜ-Leitungen auf die Umwelt geringer als die vergleichbarer Wechselstromleitungen herkömmlicher Technologie.

Alles in allem zeigt unser Szenario eine Möglichkeit auf, negative Umwelteinflüsse der Energieerzeugung effektiv zu verringern. Dieses Modell

könnte auch für einen weltweiten Einsatz gelten. Unter anderem wurde dies durch eine Studie des US-Amerikanischen *Department of Energy (DOE)* zur Machbarkeit dieses Konzepts in den USA bestätigt [33].

Wie schon gezeigt, wird in Zukunft die Meerwasserentsalzung im großen Stil unverzichtbar sein. Wenn sie anstelle von fossilen Brennstoffen mit Sonnenenergie betrieben wird, können ihre Auswirkungen auf die Umwelt wesentlich reduziert werden. Dennoch stellt die Meerwasserentsalzung selbst aufgrund der entstehenden Salzlauge und der erforderlichen chemischen Zusätze zum Schutz der Anlage eine beachtliche Belastung für die Umwelt dar.

Nano-Filtration des Wasserzufflusses kann den Bedarf an chemischen Zusätzen reduzieren, allerdings wird in diesem Fall mehr Energie benötigt. Aus diesem Grund haben eine erhöhte Effizienz des Wasserverbrauchs, besseres Wassermanagement und verbesserte Wasserinfrastruktur ebenfalls eine sehr hohe Priorität, um den Bedarf an Entsalzung gering zu halten. Zudem wird eine neue Generation sauberer und umweltverträglicher Meerwasserentsalzungsanlagen entstehen, die die Versorgung zukünftiger Generationen nachhaltig sichern kann [12].

## 7.9 Elektrizität in anderen Energiesektoren

Eine nachhaltige Lösung muss auch für die Sektoren Wärme- und Kälteerzeugung sowie den Transportsektor gefunden werden. Energieeffizienz und ein wachsender Anteil an erneuerbaren Energien sind nützliche Orientierungshilfen für diese Sektoren. Auf lange Sicht existiert die Option, einen teilweisen Wechsel von traditioneller Wärme und Brennstoffen hin zu elektrischem Strom zu vollziehen. Beispiele für einen solchen Wechsel sind elektrische Wärmepumpen oder direkte Nutzung von Elektrizität zur Raum- und Wassererwärmung sowie Elektro- oder Hybridfahrzeuge. Hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit stellt der sich aus diesem Wechsel ergebende höhere Strombedarf kein Problem dar, wenn der Strom hauptsächlich aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. Im Stromsektor wird jede Kilowattstunde Strom aus Solar- und Windenergie zwei bis drei kWh aus Steinkohle, Erdöl, Erdgas oder Uran gewonnener Primärenergie ersetzen.<sup>5</sup>

Diese Relation hängt von der tatsächlichen Effizienz der konventionellen Primärenergieumwandlung ab, die zwischen etwa 20 % im Transportsektor und etwa 80 % bei der Raumheizung rangiert. Auf diese Weise

---

<sup>5</sup> Wenn man von einer typischen Effizienz eines konventionellen Kraftwerks von 30-50 % ausgeht.

wird die Nutzung erneuerbaren Stroms zu Effizienzgewinnen in allen Energiesektoren beitragen. Ein teilweiser langfristiger Wandel anderer Sektoren hin zu sauberer elektrischer Energie ist möglich, da das Potential erneuerbarer Energie in EU-MENA groß genug ist, um den zusätzlichen Bedarf zu decken. Neben Strom existieren direkte Lösungen mithilfe von erneuerbaren Energiequellen auch für diese Sektoren, wie z.B. die Nutzung von Bio-Brennstoffen für Transport und Wärmeerzeugung, energieeffiziente Gebäude und Solarwassererhitzer, um nur einige Beispiele zu nennen [15].

Kombinierte Wärme- und Stromerzeugung ist eine wichtige Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz fossiler Brennstoffe. Einige erneuerbare Technologien, wie Biomasse, geothermische Energie und CSP Kraftwerke nutzen ebenfalls diese Option zur kombinierten Erzeugung von Wärme und Strom – typischerweise mit Hilfe von Dampf – für industrielle Prozesse, Kühlung und Entsalzung, und werden einen wachsenden Anteil im Stromversorgungssystem der Zukunft einnehmen.

## 7.10 Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht quantifiziert das Potential erneuerbarer Energien in Europa, dem Mittleren Osten und Nordafrika und bestätigt, dass diese in der Lage sind, eine sichere und bedarfsgerechte Stromversorgung bereitzustellen. Für einen schnellen Wechsel zu sauberer und sicherer Energie ist eine Verbindung der Elektrizitätsnetze Europas, des Mittleren Ostens und Nordafrikas (EU-MENA) von großem Vorteil. Unsere Studie bewertet das Potential und den Nutzen von Solarenergie aus den Wüsten. Das konventionelle Stromnetz ist nicht geeignet, große Strommengen über weite Entfernungen zu transportieren. Deshalb wird eine Kombination aus dem konventionellen Wechselspannungsnetz für die lokale Verteilung und HGÜ-Technologie für die Fernübertragung von Regelleistung nach Europa genutzt. Das Konzept basiert hauptsächlich auf erneuerbaren Energien mit Backup durch fossile Brennstoffe. Nachhaltige Energie wird ebenfalls für die Trinkwasserversorgung durch Meerwasserentsalzung notwendig sein.

Die Ergebnisse unserer Studien können in den folgenden Aussagen zusammengefasst werden:

1. Ein ausgewogener Mix aus verschiedenen erneuerbaren Energiequellen, gestützt durch fossile Brennstoffe, kann nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Elektrizität bereitstellen. Unser Szenario für EU-MENA geht vom im Jahr 2000 existierenden 16 % Anteil erneuerbarer Energie aus und erreicht einen Anteil von 80 % im Jahr

2050. Zur Ergänzung der erneuerbaren Energiequellen wird eine effiziente Backup-Infrastruktur benötigt, die eine sichere bedarfsgerechte Stromkapazität mittels schnell reagierender, mit Erdgas betriebener Spitzenlastkraftwerke bereitstellt und mit Hilfe einer effizienten Netzinfrastruktur Strom erneuerbarer Herkunft nach Bedarf von den ertragreichsten Produktionsstandorten an die Hauptverbrauchszentren liefert.

2. Zur Markteinführung von Strom erneuerbarer Herkunft wird anfängliche Unterstützung in Form von langfristigen Stromabnahmeverträgen benötigt, die die Betriebskosten und einen angemessenen Gewinn aus dem investierten Kapital decken. Dies wird sich in einem geringfügigen Anstieg der nationalen Strompreise niederschlagen, aber langfristig deren Eskalation dank des wachsenden Anteils immer günstiger werdender erneuerbarer Energien abwenden.
3. Bei sofortiger Einführung kann der Wechsel zu einem nachhaltigen Energiemix innerhalb einer Zeitspanne von 15 Jahren zu einer kostengünstigeren Stromerzeugung führen, als bei Beibehaltung der gewohnten Strategie der Fall wäre. Fossile Brennstoffe mit ständig wachsenden Kosten werden sukzessive durch erneuerbare und in der Mehrzahl einheimische Energieformen ersetzt.
4. Die negativen sozioökonomischen Effekte des Anwachsens der Preise fossiler Brennstoffe seit dem Jahr 2000 können bis 2020 gestoppt werden, wenn adäquate politische und rechtliche Rahmenbedingungen für die Markteinführung erneuerbarer Energiequellen rechtzeitig etabliert werden. Langfristige Stromabnahmeverträge, die beispielsweise in den Erneuerbaren-Energie-Gesetzen in Deutschland und Spanien verordnet werden, sind effektive Instrumente für die Markteinführung von erneuerbaren Energien. Wenn anfängliche Tarifaufschläge in der Folge auf Null reduziert werden, können sie vielmehr als öffentliche Investition in eine bezahlbare und sichere Energieerzeugung betrachtet werden, und nicht als staatliche Subvention.
5. Solarenergie, die durch solarthermische Kraftwerke in MENA erzeugt und mit Hilfe von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) nach Europa transferiert wird, kann eine sichere Kapazität für Grundlast- und Spitzenlaststrom bereitstellen, und somit europäische Energiequellen wirksam ergänzen. Wird zwischen den Jahren 2020 und 2050 mit einem Transfer von 60 TWh/a begonnen, könnten Sonnenenergieimporte bis zum Jahr 2050 auf bis zu 700 TWh/a ausgebaut werden. Hohe Sonnenstrahlung in MENA und niedrige Übertragungsverluste von ca. 10 % nach Europa werden in einem

konkurrenzfähigen Preis von ca. 0,05 €/kWh<sup>6</sup> für den Import von Sonnenenergie resultieren.

6. Anstelle einer Verdoppelung der Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2050, die mit großer Wahrscheinlichkeit Folge der Beibehaltung des gewohnten Schemas wäre, können die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Stromerzeugung in EU-MENA in unserem Szenario auf 38 % der Emissionen des Jahres 2000 reduziert werden. Nur 1 % der Landfläche wird dafür benötigt, das entspricht der gegenwärtigen Landnutzung für Transport und Verkehr in Europa.
7. Wachsende Trinkwasserdefizite in MENA werden zunehmend die Entsalzung von Meerwasser erfordern, allerdings muss dies mittels erneuerbarer Energie erfolgen. Solarstrom für die Umkehrosmose und solare Kraft-Wärme-Kopplung für die thermische Meerwasserentsalzung sind die Hauptanwärter für eine solche nachhaltige Lösung.
8. Europäische Unterstützung für MENA zur Markteinführung von erneuerbaren Energien kann den Druck auf fossile Brennstoffressourcen verringern, der andernfalls aus dem wirtschaftlichen Wachstum in dieser Region entstünde. Auf diese Weise kann indirekt auch dazu beigetragen werden, fossile Brennstoffvorräte für Europa zu sichern.
9. Der notwendige politische Prozess könnte durch eine Partnerschaft für erneuerbare Energie und eine gemeinsame Handelszone in EU-MENA initiiert werden und in einer Gemeinschaft für Energie-, Wasser- und Klimasicherheit gipfeln.

Um diese Vorteile zu realisieren, müssen die Regierungen der EU-MENA-Länder jetzt die Initiative ergreifen und die rechtlichen und finanziellen Rahmenbedingungen für eine neue Investition in saubere und nachhaltige Energie schaffen. Die im Jahr 2008 durch Nicolas Sarkozy gegründete Union für das Mittelmeer (UfM) und der damit verbundene Mediterranean Solar Plan (MSP) sowie die 2009 durch die Munich-Re und die Desertec Foundation ins Leben gerufene Industrieinitiative Dii GmbH haben in Europa wie Nordafrika grosses Interesse an dem Thema „Wüstenstrom“ geweckt. Zahlreiche weitere Initiativen à la Desertec wurden inzwischen im Norden wie im Süden gestartet, um das Konzept der „Erschliessung erneuerbarer Energiequellen an ihren besten Standorten und den Transport der Energie über teils grosse Entfernungen zu den Verbrauchszentren“ zu verwirklichen. Die EU-Aussenministerin Ashton sprach vor kurzem in einem Bericht an das Europäische Parlament von einer möglichen „Energieunion“

---

<sup>6</sup>In konstantem Geldwert des Jahres 2000, Zins real 6 % auf 40 Jahre, Umrechnung in heutige Preise durch hinzufügen der Inflation.

im Rahmen einer „Partnerschaft für Demokratie und gemeinsame Entwicklung mit der Region südlich des Mittelmeers“.

Da Energie auch eine Vorbedingung für eine nachhaltige Wasserversorgung ist, ist eine kurzfristige Entscheidung der EU-MENA-Regierungen, diesen Pfad zu ebnen und geeignete Rahmenbedingungen dafür zu schaffen, von fundamentaler Bedeutung für die gesamte Region.

## Literatur

- [1] F. Trieb, C. Schillings, S. Kronshage, P. Viebahn, N. May, C. Paul, U. Klann, M. Kabariti, A. Bennouna, H. Nokraschy, S. Hassan, L. Georgy Yusef, T. Hasni, N. Bassam, and H. Satoguina, “Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. German Aerospace Center (DLR), Study for the German Ministry of Environment, Nature Conversation and Nuclear Safety,” April 2005.
- [2] F. Trieb, C. Schillings, S. Kronshage, P. Viebahn, N. May, C. Paul, U. Klann, M. Kabariti, A. Bennouna, H. Nokraschy, S. Hassan, L. Georgy Yusef, T. Hasni, N. Bassam, and H. Satoguina, “TRANS–CSP Trans–Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power. German Aerospace Center (DLR), German Ministry of Environment, Nature Conversation and Nuclear Safety.” [www.dlr.de/tt/trans-csp](http://www.dlr.de/tt/trans-csp), June 2006.
- [3] United Nations (UN), “World Population Prospects. The 2004 Revision Population Data Base, Medium Growth Scenario, Department of Economic and Social Affairs, Population Division Homepage.” <http://esa.un.org/unpp>, 2006.
- [4] F. Trieb and H. Müller–Steinhagen, “Concentrating Solar Power for Seawater Desalination in the Middle East and North Africa (submitted for review),” *Desalination*, 2007.
- [5] F. Trieb and U. Klann, “Modelling the Future Electricity Demand of Europe, Middle East and North Africa. Internal Report, DLR.” [http://www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/system/projects/all\\_projects/projektbeschreibung\\_med-csp/additional\\_reports/Demand-Model\\_20061128.pdf](http://www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/system/projects/all_projects/projektbeschreibung_med-csp/additional_reports/Demand-Model_20061128.pdf), 2006.
- [6] International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook 2006.” <http://www.worldenergyoutlook.org>, Paris, 2006.

- [7] Commission of the European Communities, “World Energy Technology Outlook 2050 (WETO-H2).” [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto-h2\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto-h2_en.pdf), 2006.
- [8] Commission of the European Communities, “GREEN PAPER. A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy. COM(2006) 105 final Brussels.” [http://europa.eu.int/comm/energy/green-paper-energy/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/energy/green-paper-energy/index_en.htm), 2006.
- [9] L. Mantzos and P. Capros, “European Energy and Transport Trends to 2030. Update 2005. The European Commission.” [http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/figures/trends\\_2030/1\\_pref\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/trends_2030/1_pref_en.pdf), Brussels, 2005.
- [10] G. Benoit and A. Comeau, “A Sustainable Future for the Mediterranean.” <http://shop.earthscan.co.uk/ProductDetails/mcs/productID/667>, Earthscan 2005.
- [11] S. Teske, A. Zervos, and O. Schäfer, “Energy (R)evolution (Greenpeace).” [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/energie/energyrevolutionreport\\_engl.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/energyrevolutionreport_engl.pdf), EREC, 2007.
- [12] F. Trieb, C. Schillings, P. Viebahn, C. Paul, H. Altowaie, T. Sufian, W. Alnaser, M. Kabariti, W. Shahin, A. Bennouna, H. Nokraschy, J. Kern, G. Knies, N. El Bassam, I. Hasairi, A. Haddouche, H. Glade, and A. Aliewi, “AQUA–CSP Concentrating Solar Power for Seawater Desalination. German Aerospace Center (DLR), Study for the German Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (ongoing).” [www.dlr.de/tt/aqua-csp](http://www.dlr.de/tt/aqua-csp), Stuttgart, 2007.
- [13] S. Awerbuch and M. Berger, “Energy diversity and security in the EU. Applying portfolio theory to EU electricity planning and policy-making, IEA Report EET/2003/03.” <http://www.iea.org/textbase/papers/2003/port.pdf>, February, 2003.
- [14] European Environment Agency (EEA), “Energy Subsidies in the European Union, EEA Technical Report 1/2004.” [http://reports.eea.europa.eu/technical\\_report\\_2004\\_1/en](http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2004_1/en), Copenhagen, 2004.
- [15] W. Dürschmidt, G. Zimmermann, and D. Böhme, “Renewable Energies. Innovation for the Future. German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.” <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/37453/36356>, Berlin, 2006.

- [16] Nuclear Decompassing Authority (NDA), “Managing the Nuclear Legacy. A Strategy for Action. Whitepaper of the UK Nuclear Decommissioning Authority.” [www.nda.gov.uk](http://www.nda.gov.uk), London, 2002.
- [17] Helmholtz-Gemeinschaft der Großforschungsunternehmen (HGF), “Hearing on Nuclear Fusion before the Bundestag Committee for Education, Research and Technology Assessment.” [http://fire.pppl.gov/eu\\_bundestag\\_english.pdf](http://fire.pppl.gov/eu_bundestag_english.pdf), Berlin, 2001.
- [18] AT Kearney, “Solar Thermal Electricity 2025. Clean Electricity on Demand: Attractive STE Cost Stabilize Energy Production.” [http://www.atkearney.de/content/veroeffentlichungen/whitepaper\\_detail.php/id/51077/practice/telekomm](http://www.atkearney.de/content/veroeffentlichungen/whitepaper_detail.php/id/51077/practice/telekomm), ESTELA, June 2010.
- [19] MED-CSD, “Combined Solar Power and Desalination Plants (Project MED-CSD). Techno-Economic Potential in Mediterranean Partner Countries. Observatoire Méditerranéen de l’Energie.” <http://www.med-csd-ec.eu/eng>, May 2010.
- [20] G. Asplund, “Sustainable Energy Systems with HVDC Transmission, at IEEE PES 2004 General Meeting, Denver, 6-12 June 2004.” [http://ewh.ieee.org/cmte/ips/2004GM/2004GM\\_GlobalPowerSystems.pdf](http://ewh.ieee.org/cmte/ips/2004GM/2004GM_GlobalPowerSystems.pdf), [www.abb.com](http://www.abb.com), 2004.
- [21] Union of the Electricity Industry, Eurelectric, “Mediterranean Interconnection. SYSTMED.” <http://public.eurelectric.org/Content/Default.asp?PageID=35>, Brussels, 2003.
- [22] F. Trieb, R. Tamme, and H. Müller–Steinhagen, *Solarthermische Kraftwerke. Regelleistung aus Sonnenenergie. ETG-Fachbericht 127. Die Dynamik des Netzes. Konsequenzen für Erzeugung, Übertragung und Verteilung im sich verändernden Umfeld.* Berlin und Offenbach: VDE Verlag, 2011. ISBN 978-3-8007-3336-1, <http://www.vde-verlag.de/proceedings-en/453336012.html>.
- [23] F. Trieb, H. Müller–Steinhagen, and J. Kern, “Financing Concentrating Solar Power in the Middle East and North Africa. Subsidy or Investment?,” *Energy Policy*, vol. 39, pp. 307–317, 2011.
- [24] L. A. Brischke, “Model of a Future Electricity Supply in Germany with Large Contributions from Renewable Energy Sources using a Single Node Grid (in German), VDI Fortschritt Berichte, Reihe 6, Energietechnik, Nr. 530, ISBN 3-18-353006-6.” <http://>

[www.vdi-nachrichten.com/onlineshops/buchshop/literaturshop/lang-anzeige.asp?vr\\_id=7124](http://www.vdi-nachrichten.com/onlineshops/buchshop/literaturshop/lang-anzeige.asp?vr_id=7124), VDI Düsseldorf, 2005.

- [25] L. Neij et al., “Experience Curves: A Tool for Energy Policy Assessment. Lund University. European Commission.” [http://www.iset.uni-kassel.de/extool/Extool\\_final\\_report.pdf](http://www.iset.uni-kassel.de/extool/Extool_final_report.pdf), Lund, 2003.
- [26] R. Pitz–Paal, J. Dersch, and B. Milow, “European Concentrated Solar Thermal Road Mapping. ECOSTAR. SES6-CT-2003-502578. European Commission, 6th Framework Programme, German Aerospace Center.” [ftp://ftp.dlr.de/ecostar/ECOSTAR\\_Roadmap2005.pdf](ftp://ftp.dlr.de/ecostar/ECOSTAR_Roadmap2005.pdf), Cologne, 2005.
- [27] Greenpeace, “Concentrating Solar Power: Global Outlook 2009. Greenpeace, ESTELA and SolarPaces.” <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009>, 2009.
- [28] International Energy Agency (IEA), “Technology Roadmap Concentrating Solar Power.” [www.iea.org](http://www.iea.org), Paris, 2010.
- [29] A. Bennouna and H. Nokraschy, “A Sustainable Solution to the Global Problem of Water Scarcity in the Arab World, Proceedings of GCREADER Conference, Amman,” 2006.
- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2001. Synthesis Report. Summary for Policy Makers.” [www.ipcc.ch/pub/un/syrenng/spm.pdf](http://www.ipcc.ch/pub/un/syrenng/spm.pdf), 2001.
- [31] H. Graßl et al., “World in Transition. Towards Sustainable Energy Systems, German Advisory Council on Global Change. WBGU.” [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2003\\_engl.html](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_engl.html), Berlin March, 2003.
- [32] N. May, “Eco-Balance of Solar Electricity Transmission from North Africa to Europe. Diploma Thesis. University of Braunschweig.” <http://www.dlr.de/tt/trans-csp>, 2005.
- [33] H. Price, “DLR TRANS–CSP Study Applied to North America, Department of Energy of the United States of America (DOE).” <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/910505-F2lSrR>, 2007.
- [34] BMU, “The Renewable Energy Sources Act. German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU).” <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/6465/5982>, Berlin, 2004.

- [35] F. Trieb, H. Müller–Steinhagen, J. Kern, J. Scharfe, M. Kabariti, and A. Al Taher, “Technologies for Large Scale Seawater Desalination Using Concentrated Solar Radiation (submitted for review),” *Desalination*, 2007.
- [36] World Bank, “Global Environmental Facility, Promotion of a Wind Power Market in Jordan: Project Executive Summary, GEF Council Work Programme Submission.” [http://www.gefweb.org/documents/Council\\_Documents/GEF\\_C28/documents/2555JordanWindExecutive-Summary04-26-06Clean.pdf](http://www.gefweb.org/documents/Council_Documents/GEF_C28/documents/2555JordanWindExecutive-Summary04-26-06Clean.pdf), Washington, 2006.



## Kapitel 8

# Energie ist Chemie – Katalyse als Schlüsseltechnik. Energie von Morgen: Eine Momentaufnahme

*Malte Behrens und Robert Schlögl*

### 8.1 Das Energieproblem

Die aktuelle Energiediskussion wird getrieben von drei unangenehmen und zum Teil schon sehr lange bekannten Wahrheiten:

1. Die Vorräte an fossilen Brennstoffen sind endlich und werden in einigen Jahrzehnten erschöpft sein.
2. Das bei der Nutzung dieser Brennstoffe freigesetzte Verbrennungsgas Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) fördert die globale Erwärmung und die Klima-  
veränderung.
3. Das ungelöste Problem der Atommüllentsorgung macht die Kern-  
energie zu einer nicht nachhaltigen Technologie, die - wie die aktuel-  
len Ereignisse in Japan zeigen - außerdem mit einem unkontrollier-  
baren Restrisiko verbunden und somit gefährlich ist.

Dem gegenüber stehen ein riesiger Energiebedarf in den westlichen Wohlstandsgesellschaften und ein wachsender Energiehunger in den sich entwickelnden Ländern. In einer Pro-Kopf-Betrachtung liegen Länder wie die USA, Kanada, Australien und die westeuropäischen Staaten sowohl beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß als auch beim Bruttoinlandsprodukt in der Spitzen-  
gruppe. Diese Korrelation reflektiert den mit hohem Lebensstandard ein-  
hergehenden großen Energiebedarf. Betrachtet man allerdings die absolu-  
ten Werte bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen, so ergibt sich ein anderes Bild. La-  
gen um die Jahrtausendwende die gut entwickelten OECD-Staaten und  
die nicht-OECD-Staaten (mit weitaus mehr Einwohnern) in ihrem CO<sub>2</sub>-  
Ausstoß mit ca. 10 Gigatonnen noch ungefähr gleichauf, so hat sich dieser  
Wert für die nicht-OECD-Staaten in den letzten 10 Jahren nahezu verdop-  
pelt, während bei den OECD-Staaten nur ein geringes Wachstum um ca.  
2 Gigatonnen zu verzeichnen war<sup>1</sup>. Die sehr begrüßenswerte und zu unter-  
stützende Entwicklung hin zu einer Verbesserung der Lebensverhältnisse

---

<sup>1</sup>Quelle: IEA Report 2008.

in ärmeren Ländern stellt die Menschheit vor neue und große Herausforderungen, da sie die in den oben genannten Punkten 1 und 2 aufgeführten Probleme stark beschleunigt und Kernenergie nicht unser Ausweg sein kann, siehe Punkt 3. Die Bestrebungen von Ländern wie Indien oder China zur Verbesserung ihrer Infrastruktur und ihres Wohlstandes sind dabei natürlich völlig berechtigt und alternativlos. Das Problem wird dadurch verschärft, dass sich diese Länder unseren im Westen mitunter verschwenderischen Umgang mit Energie und unsere nicht-nachhaltige Technologie zur Energieumwandlung – Verbrennung fossiler Energieträger und Kernenergie –, die schon in Vergangenheit und Gegenwart für die oben genannten Probleme verantwortlich waren, zum Vorbild nehmen.

Diese Lage führt zu der Schlussfolgerung, dass das Problem nicht ausschließlich in Europa oder gar Deutschland, sondern nur global, insbesondere unter Einbeziehung Asiens, gelöst werden kann. Dieses Argument wird von Gegnern einer Energiewende gerne angeführt, um erste Maßnahmen in diese Richtung zu blockieren. Wir im Westen sind aber keineswegs aus der Verantwortung entlassen. Die Rolle Deutschlands und Europas im Prozess der Problemlösung muss sein, neue und innovative Technologien, die einen nachhaltigen Umgang mit Energie erlauben, zu erforschen, zu entwickeln und auch anzuwenden. Ein solcher Beitrag kann nur an hoch entwickelten Forschungs- und Technologiestandorten erbracht werden. Ziel muss es sein, unsere Wissens- und Technologiepotenziale dafür einzusetzen, dass sich Deutschland und Europa zu einer Leitregion für nachhaltige Energieumwandlung entwickelt und diese Ideen und Technologien dann zu exportieren.

## 8.2 Die Dimension der Herausforderung

Das Energieaufkommen in Deutschland entspricht ca. 3-4 % des weltweiten Aufkommens und betrug im Jahr 2004 548,6 Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten (M t SKE) mit einer Importquote von knapp 74 % (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.). Nach Abzug von Export und Bunkerung bleibt ein Primärenergieverbrauch von 477,5 M t SKE. 27 % hiervon gehen als Umwandlungsverluste verloren und der Endenergieverbrauch teilt sich relativ gleichmäßig auf die Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen auf. Um diese großen Werte und ungewohnten Einheiten zu veranschaulichen, kann man sie in greifbarere Größen umrechnen. So entspricht eine Tonne Steinkohleeinheiten (also weniger als der einhundertmillionstel Teil des deutschen Energieverbrauchs) etwa 800 l Diesel oder etwa 7.000.000 kcal, was der

Nahrung eines Menschen für 10 Jahre entspricht, oder ca. 8.150 kWh, was ungefähr dem Stromverbrauch einer Familien für zwei Jahre gleichkommt. Mit dem deutschen Nettoenergieverbrauch ließe sich die gesamte Weltbevölkerung für fünf Jahre ernähren.

Um eine Brücke zur sogenannten Wasserstoffwirtschaft zu schlagen, kann man 1 t SKE auch in den Energiegehalt von Wasserstoff umrechnen und kommt auf 2.713 m<sup>3</sup> Wasserstoff. Geht man von den in Laboratorien üblichen 200 bar-Druckgasflaschen mit 50 l Inhalt aus, würde jeder Deutsche pro Tag sechs solcher Flaschen verbrauchen, in China oder Indien hingegen liegt der Verbrauch bei durchschnittlich nur etwa einer Flasche. Der gesamte Energiebedarf der Menschheit entspricht der Anzahl von 5.000.000.000.000 solcher Flaschen pro Jahr.

Diese Überlegungen zeigen, dass man die große Dimension des Energieproblems bei allen Lösungsansätzen als unveränderliche Randbedingung betrachten muss. Dies gilt sowohl für zentralisierte als auch für dezentralisierte Szenarien. Allein schon aufgrund dieser Dimension wird klar, dass es sich bei einer Energiewende um einen Prozess handeln muss, welcher sich stufenweise über mehrere Jahrzehnte hinziehen und mit immensen Kosten und Anstrengungen verbunden sein wird. Insbesondere für die frühen Stufen erscheinen solche Lösungsansätze als geeignet, die auf der Veränderung erprobter und damit zumindest in gewissen Grenzen skalierbarer Prozesse basieren. Hier können die chemische Umwandlung von Energie und ihre Speicherung in chemischen Bindungen eine wichtige Rolle spielen, wie sie zum Teil heute schon von der chemischen Industrie für nicht-energetische Anwendungen durchgeführt werden. Auch hierbei ist zu bedenken, dass der weltweite Energiebedarf das Gesamtvolumen der heutigen chemischen Industrie immer noch ungefähr um den Faktor 20 übersteigt.

### 8.3 Der Status Quo

Auch die Natur bedient sich in ihrem Kreislauf der chemischen Umwandlung von Energie. Dies ist in Abbildung 8.1 schematisch dargestellt.

Im Zusammenspiel von Photosynthese und Atmung werden in der Natur Kohlenhydrate aus CO<sub>2</sub> und Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht aufgebaut. Aus den Kohlenhydraten kann dann Biomasse aufgebaut werden oder sie werden oxidiert, um dissipative Lebensvorgänge zu ermöglichen. Übrig bleiben sowohl bei der Oxidation als auch beim Abbau der Biomasse wiederum CO<sub>2</sub> und Wasser. Für diese energiearme Seite des Kreislaufs existieren natürliche Speicher und Wasser sowie CO<sub>2</sub> als ein Bestandteil der Luft und von Karbonatgestein finden wir in der Natur im Überfluss.

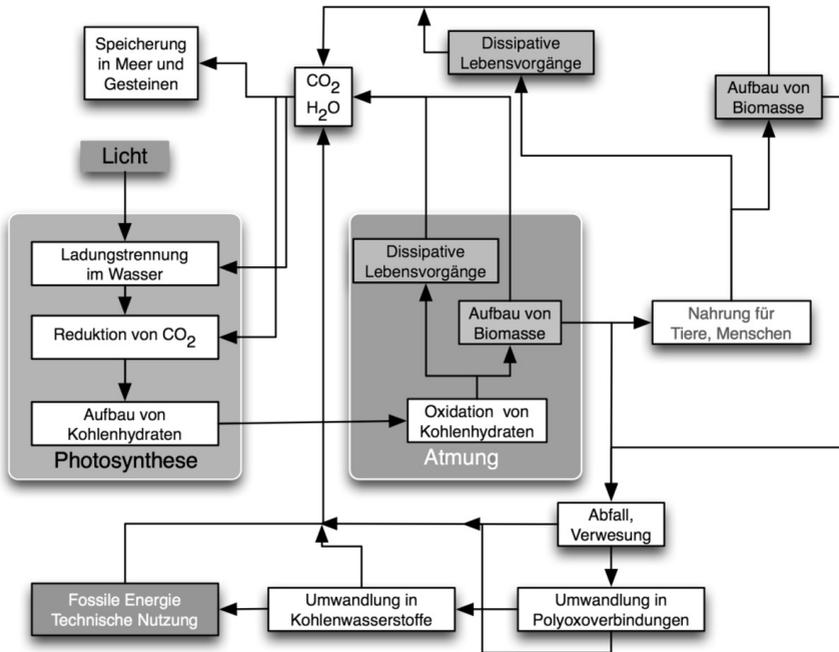


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung des natürlichen Systems aus Photosynthese und Atmung. Aus diesem Kreislauf speist sich der Energiespeicher der Natur, die Biomasse, aus der sich die fossilen Brennstoffe (unten links) entwickelt haben.

Allerdings speichert die Natur auch einen Teil der Moleküle auf der energiereichen Seite des Kreislaufs. Durch besondere Abbaubedingungen von Biomasse können sich im Laufe von geologischen Zeiträumen die uns bekannten fossilen Brennstoffe bilden. Verglichen mit der ursprünglichen Biomasse wurde dabei die Energiedichte stark erhöht.

Mit der Nutzung von fossilen Brennstoffen bedienen wir uns also aus dem Energiespeicher der Natur. Wir verbrennen quasi riesige, vorzeitliche Urwälder, die eigentlich von der Natur aus dem CO<sub>2</sub>-Kreislauf hinaus genommen wurden. Weltweit macht der Anteil der fossilen Brennstoffe am Energieaufkommen ca. 85 % aus. Der besondere Vorteil von Kohle, Erdöl und Erdgas ist ihre hohe Energiedichte und ihr einfacher Transport und Lagerung. Dies führt dazu, dass man je nach schwankendem Energiebedarf

die Leistung der Verbrennungskraftwerke relativ einfach anpassen kann. Die besonderen Nachteile der Nutzung von fossilen Brennstoffen sind ihre Verknappung und das Ausmaß der mit der Verbrennung verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

#### 8.4 Nutzung von regenerativen Energien

Wie können wir unseren Energiebedarf verlässlich befriedigen, ohne dabei auf die Speicher der Natur zurückzugreifen? Die Antwort sind natürlich die erneuerbaren Energien wie Wind- oder Wasserkraft und Solarenergie. Insbesondere die Sonne stellt eine gigantische Energiequelle dar, die uns zur Verfügung steht. Um den gesamten Energiebedarf der Welt zu decken, müssten wir nur weniger als 0,2 % des Sonnenlichteinfalls nutzbar machen. Anders als die fossilen Brennstoffe ist Energie selbst also keineswegs knapp und die grundsätzlichen Techniken zur Nutzung der Sonnenenergie sind vorhanden oder im Entwicklungsstadium. Dies sind z.B. solarthermische Kraftwerke oder die Photovoltaik. Im Verbund mit Wind- und Wasserkraft, Geothermie und – mit Einschränkungen – Energie aus Biomasse sind diese Techniken in der Lage, unseren Energiebedarf mehr als zu decken. Dies ist auch das Ziel der Energiewende der Bundesregierung, die im Jahr 2050 ca. 80 % des deutschen Energiebedarfs aus erneuerbaren Quellen erfüllen will.

Es gibt gesellschaftliche und technologische Hindernisse auf dem Weg dorthin. Dies sind zum einen die enormen Kosten, die mit dem Aufbau neuer und der Veränderung vorhandener Energie-Infrastruktur verbunden sind. Es muss einen politischen Konsens darüber geben, dass diese Kosten sinnvoll in unsere Zukunft investiert sind. Zu den gesellschaftlichen Herausforderungen gehört aber auch, unser individuelles Verhalten und unsere Gewohnheiten beim Umgang mit Energie ändern zu wollen, spürbar nicht nur beim Bezahlen der Kosten für erneuerbare Energie, sondern auch bei der Bereitschaft Energie einzusparen und Veränderungen wie z.B. den notwendigen Netzausbau in unserer Lebensumgebung zuzulassen. Die technologischen Probleme der Umstellung auf erneuerbare Energien sind mit der Bereitstellung der Primärenergie durch entsprechende Kraftwerke oder mit der Verteilung der Energie durch Stromnetze verbunden, aber insbesondere auch mit der Speicherung von regenerativer Energie.

Sonneneinstrahlung und Windstärke schwanken stark und sind vom Wetter anhängig. Es kommt unweigerlich vor, dass Zeiten mit hohem Energiebedarf mit Zeiten niedriger Leistung aus Sonnen- oder Windkraft zusammenfallen. Ebenso kommt es vor, dass es zu Zeiten hoher Stromproduk-

tion bei Sonnenschein oder starkem Wind nicht genügend Abnehmer gibt, so dass z.B. die Windkraftanlagen bei starkem Wind abgestellt werden müssen. Man benötigt also ein Speichersystem für erneuerbare Energien, das es erlaubt, solche Senken und Spitzen abzufangen, indem der Speicher angezapft bzw. aufgeladen wird.

Während der Aufbau der zur Energiewende nötigen Infrastruktur vor allem Geld, also politischen Willen, erfordert, ansonsten aber aus Ingenieurssicht durchaus heute schon umsetzbar ist, brauchen wir für die Erarbeitung von leistungsstarken Speicherkonzepten noch Anstrengungen in Forschung und Entwicklung.

## 8.5 Speicherung regenerativer Energie

Es gibt physikalische, biologische und chemische Methoden, um Energie zu speichern. Eine Übersicht ist in Abbildung 8.2 gezeigt.

Die chemischen Speichermöglichkeiten sind Aufladen von Batterien, Herstellung von Wasserstoff, Kohlenwasserstoffen, Ammoniak oder von anderen synthetischen Brennstoffen wie z.B. Methanol. Sie zeigen eine große Flexibilität und eine hohe Speicherleistungen. Interessant ist außerdem die physikalische Methode der hydroelektrischen Pumpspeicherung, die aber gewisse landschaftliche Voraussetzungen erfordert, die in Deutschland selten sind. Die direkte Speicherung von Sonnenenergie in Biomasse hat den Vorteil, dass sie quasi gratis in der Natur abläuft. Sie kann aber angesichts des benötigten Speichervolumens keine alleinige Lösung sein, da die Nutzung von Biomasse in großem Maßstab zu einer Konkurrenzsituation mit der Nahrungsmittelproduktion und zum Verlust der Biodiversität führen könnte. Eine wichtige Rolle der Biomasse ist die als „CO<sub>2</sub>-Sammler“.

Ein Energieszenario unter Einbeziehung der erneuerbaren Energien und der chemischen Energiespeicher ist in Abbildung 8.3 gezeigt.

Sonnenenergie kann zur direkten Stromerzeugung genutzt und zum Abpuffern der natürlichen Schwankungen gespeichert werden. Die Speicherung erfolgt dabei mittels Batterien (schwarz), in Form von Wasserstoff (Mitte, weiß) über elektrolytische Wasserspaltung (dunkelgrau) oder neue Verfahren („future technologies“), und als synthetische Brennstoffe auf Kohlenstoffbasis. Die Nutzbarmachung der gespeicherten Energie geschieht direkt (Batterien), durch Wasserstoffbrennstoffzellen (hellgrau) oder durch Verbrennung (synthetische Brennstoffe).

Ein solches Szenario ist erreichbar, wenn wir für die Übergangszeit (ca. 100 Jahre) Steinkohle effizient und in abnehmendem Maße einsetzen, gleichzeitig eine CO<sub>2</sub>-Umwandlungsstrategie entwickeln (synthetische

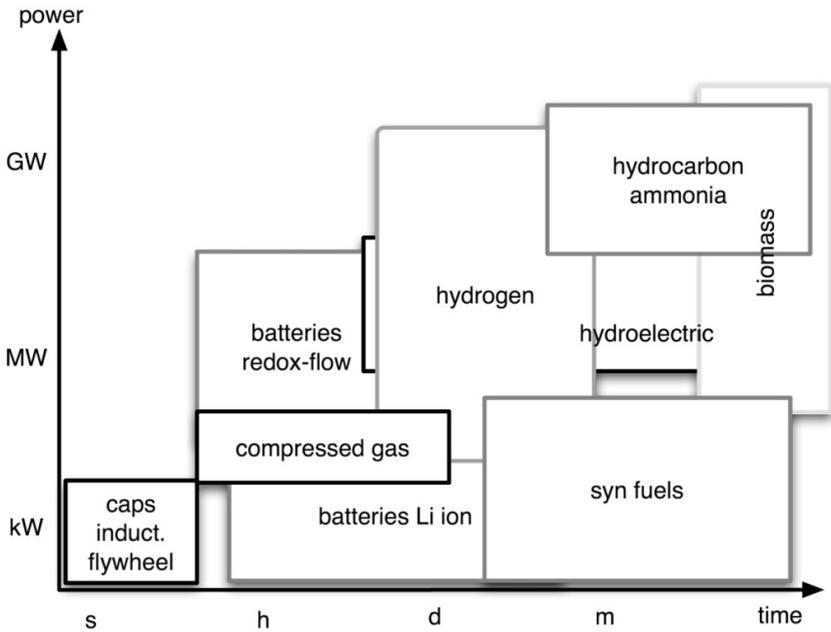


Abbildung 8.2: Verschiedene physikalische (schwarzer Rand), chemische (grauer Rand) und biologische (hellgrauer Rand) Methoden zur Speicherung von Energie mit ihren unterschiedlichen Leistungsbereichen und Speicherzeiten.

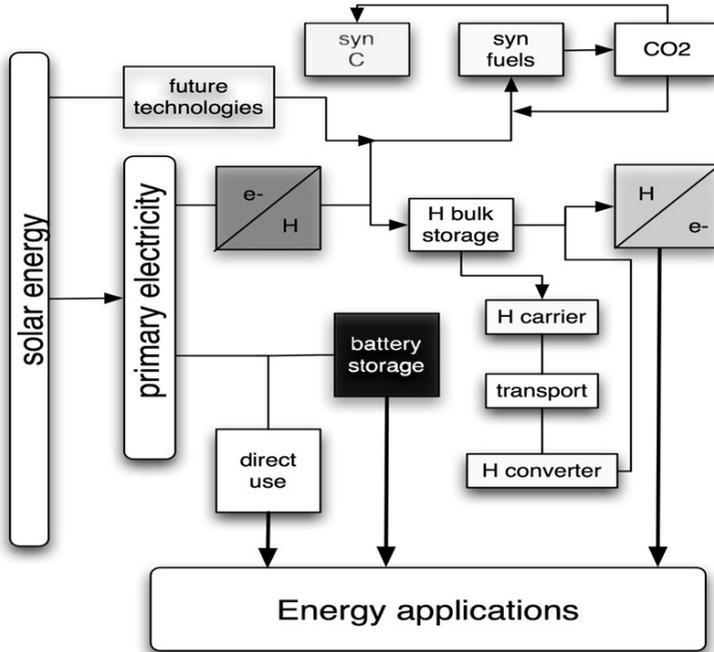


Abbildung 8.3: Schematische Darstellung der Nutzung und chemischen Speicherung von Sonnenenergie (siehe auch: R. Schlögl, ChemSusChem 3, 2010, 209.)

Brennstoffe aus  $\text{CO}_2$ ), nicht-speicherbare regenerative Energie intelligent einsetzen, und Batterien und chemische Energiespeicher weiterentwickeln.

Da die Entwicklung einer „künstlichen Photosynthese“, also der Generierung von nutzbaren Molekülen aus  $\text{CO}_2$  mit Hilfe von Sonnenlicht und Wasser, momentan noch in den Kinderschuhen steckt und noch keine Alternative sein kann, muss dem reaktiveren Wasserstoff eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung von  $\text{CO}_2$  zukommen. Ein Kernproblem, welches von Wissenschaftlern gelöst werden muss, ist die skalierbare und nachhaltige Freisetzung von Wasserstoff aus Wasser. Hier gibt es bio-, elektro- und photochemische Ansätze, die weiterentwickelt werden müssen. Insbesondere die elektrochemische Spaltung von Wasser (Elektrolyse, dunkelgrauer Kasten in Abbildung 8.3) erscheint geeignet, um den in Spitzenzeiten anfallenden überschüssigen Strom aus Wind- und Sonnenkraft zu speichern indem Wasserstoff produziert wird. Aufgrund seiner Eigenschaften ist Wasserstoff selbst allerdings auch schwierig zu speichern und auch hier besteht noch Forschungsbedarf. Eine Alternative zur physikalischen Speicherung von Wasserstoff ist die chemische Umsetzung.

## 8.6 Chemische Energiespeicher als Lösungsansatz

Der mit Hilfe von regenerativen Quellen produzierte Wasserstoff kann benutzt werden, um  $\text{CO}_2$  oder Stickstoff umzusetzen. Schematisch ist dies in Abbildung 8.4 gezeigt. Damit wird ein Teil der Energie des Wasserstoffs in Form von einfachen Molekülen wie Methanol, Methan oder höheren Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak gespeichert. Die gravimetrische Energiedichte dieser synthetischen Brennstoffe ist niedriger als die von reinem Wasserstoff, allerdings haben diese Moleküle große Vorteile im Bezug auf die Handhabbarkeit, die Transport- und Lagerfähigkeit, da sie flüssig sind oder sich leicht verflüssigen lassen.

Die Verfahren zur Umsetzung von Wasserstoff mit  $\text{CO}_2$  oder Stickstoff sind grundsätzlich bekannt. So kann durch Hydrierung von  $\text{CO}_2$  Methanol hergestellt werden (Methanolsynthese). Man kann auch CO erhalten (Wassergasreaktion) und die bekannte Synthesegaschemie mit Produkten wie Methan oder Kohlenwasserstoffen (Fischer-Tropsch-Chemie) verfolgen. Die Umsetzung von Wasserstoff mit Stickstoff wird im Haber-Bosch-Verfahren zur Ammoniaksynthese angewendet. Diese synthetischen Brennstoffe können dann entweder über Verbrennungsturbinen oder Brennstoffzellen wieder sekundäre Elektrizität liefern oder unter Ablauf der Rückreaktionen wieder Wasserstoff für Brennstoffzellen freisetzen. Vorher hat man die Option, diese Brennstoffe zu lagern oder zu transportieren. Durch

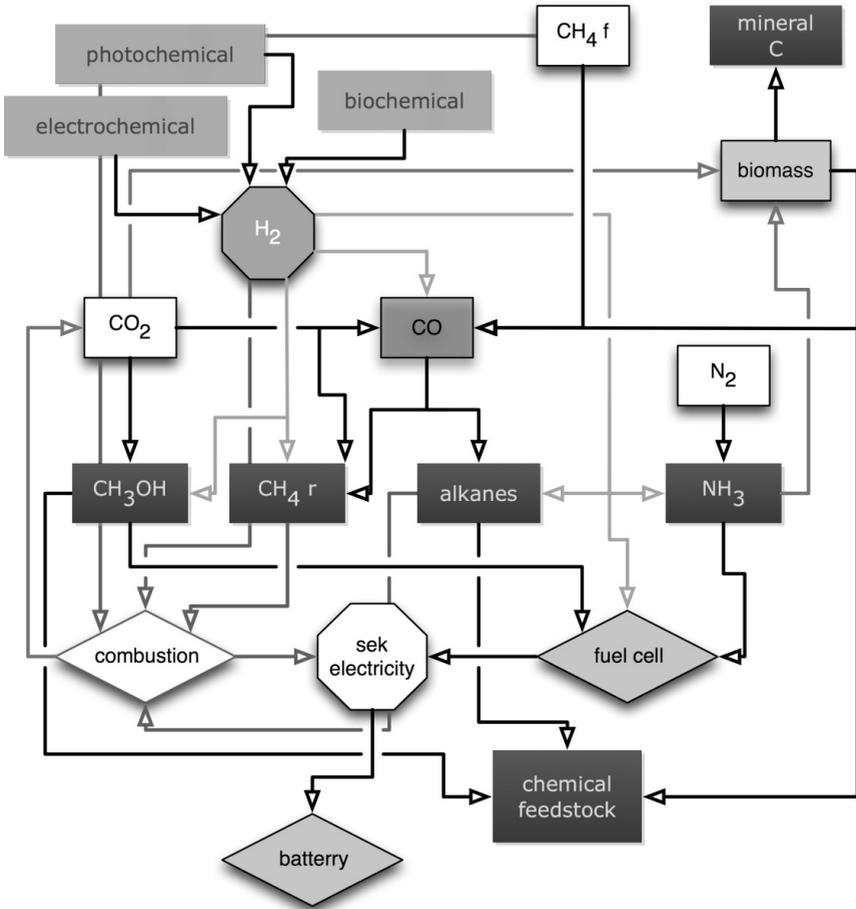


Abbildung 8.4: Die Rolle von Wasserstoff zur CO<sub>2</sub>-Umsetzung zu synthetischen Brennstoffen im Rahmen der chemischen Speicherung von regenerativer Energie.

die Verwendung von  $\text{CO}_2$  während der Produktion wären solche synthetischen Brennstoffe trotz der Verbrennung  $\text{CO}_2$ -neutral. Alternativ kann man diese Basischemikalien in den bekannten Prozessen als Grundstock für die chemische Industrie nutzen, denn auch hierfür werden Alternativen zu den fossilen Quellen gefunden werden müssen.

## 8.7 Katalyse als Schlüsseltechnik

All die im vorherigen Abschnitt erwähnten Umsetzungen können heterogen katalysiert werden, das heisst, dass die gasförmigen Edukte an einem Feststoffkatalysator zu den Produkten reagieren. Dieses Prinzip ist ähnlich wie beim Abgaskatalysator im Auto, an dem z.B. Bestandteile von nicht vollständig verbranntem Benzin mit Luftsauerstoff zu den Totalverbrennungsprodukten umgesetzt werden. Die Katalysatoroberfläche hilft die Energiebarrieren zu manipulieren, die bei chemischen Reaktionen auftreten und diese erschweren, damit die Reaktion schneller ablaufen kann.

Katalytische Prozesse sind aus der heutigen chemischen Industrie nicht wegzudenken. Nahezu alle chemischen Produkte sind in ihrer Herstellungsgeschichte mit Katalysatoren in Kontakt gekommen. Diese technologische Reife bedeutet leider nicht, dass die oben angeführten etablierten Prozesse ohne Anpassung für die beschriebenen energetischen Anwendungen eingesetzt werden können. Die Veränderung z.B. der Gaszusammensetzung und -reinheit beim Übergang von Synthesegas aus fossiler Quelle zu Mischungen von regenerativem Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  aus Kraftwerksabgas führt zu neuen Anforderungen an den Katalysator. Hier ist noch viel Forschungsarbeit notwendig, um zu einem generischen Verständnis von heterogener Katalyse zu kommen und maßgeschneiderte Katalysatoren für die oben genannten Anwendungen entwickeln zu können. Ebenso ist es wichtig, die oft verwendeten seltenen Edelmetalle durch ebenso geeignete, aber besser verfügbare Elemente zu ersetzen, um die Katalysatorherstellung selbst skalierbar und nachhaltig gestalten zu können. Wenn dies gelingt, kann die katalytische Herstellung von synthetischen Brennstoffen eine wichtige Rolle bei der Lösung des Energieproblems spielen und die einfache Speicherung und den Transport von regenerativer Energie ermöglichen. Eine Realisierung dieses Szenarios erfordert noch umfassende Forschung und Entwicklung, erscheint aber in Bezug auf die Skalierbarkeit und den heutigen Stand der Technik realistisch.

## 8.8 Zusammenfassung

Bisher haben wir unsere Energie aus dem Speicher der Natur “geborgt” und bezahlen mit der Verknappung der fossilen Brennstoffe und dem Treibhauseffekt als Preis dafür. Die Sonnenenergie kann unseren sehr großen Energiehunger allerdings gut decken und wir verfügen über grundsätzliche Technologien (teilweise im Entwicklungsstadium), um diese Energie zu nutzen. Wir können sie aber nicht sehr gut speichern und an unseren Bedarf anpassen. Hier sind vielfältige Lösungen nötig, und die Speicherung von Energie in chemischen Bindungen durch katalytische Prozesse kann einen wichtigen Beitrag leisten. Eine aufwendige, zielstrebige und langfristig angelegte Energiespeicherforschung ist daher dringend notwendig. Wir können Deutschland und Europa zu einer Leitregion für die Generierung von relevantem Wissen, für die Entwicklung der entsprechenden Technologie und für die Umsetzung dieser Potenziale machen. Im globalen Zusammenhang kann die Lösung des Energieproblems dann als ein wertvolles Exportprodukt betrachtet werden. Wir müssen wagemutig an die Probleme in Forschung und Technik herangehen. Dies erfordert Entscheidungsträger, die engagiert, informiert und frei sowohl von ideologischen Barrieren als auch von wirtschaftlichen Interessen sind.

**Mittagssymposium: Dolmetscher der Kulturen**  
Energie zwischen Natur- und Geisteswissenschaften  
Ein Streitgespräch



## **Moderation:**

Gerhard Schaefer, Hamburg

## **Kontrahenten:**

Dietrich von Engelhardt, Lübeck/München, pro Geisteswissenschaften

Gunnar Berg, Halle/Saale, pro Naturwissenschaften



## Kapitel 9

### Einleitung

*Gerhard Schaefer*

In einer Zeit weltweiter Wirtschafts- und Finanzkrisen steht im Mittelpunkt der politischen Diskussion meistens nur noch das Geld; jedoch, wenn wir genauer hinsehen, parallel zum Geld auch immer wieder der Wirtschaftsfaktor *Energie*. Geld- und Energieströme sind in der menschlichen Gesellschaft eng aneinander gekoppelt. Beide, Geld und Energie, sind ökonomisch nicht nur äquivalent, sondern in gewisser Weise auch *omnipotent*, das heißt: mit ihnen kann man, so scheint es, alles machen, alles kaufen, potentiell jedes Ziel erreichen. Sie sind dienstbare Magd für jegliche Art menschlicher Bedürfnisse. Energie hat ja auch keine Richtung, ist kein *Vektor*, sondern ein Skalar.

Kein Wunder, dass es in der Welt nicht nur einen allgemeinen Geldhunger gibt, sondern auch einen ausgesprochenen *Energie-Hunger*.

Wenn wir aber unsere Mitmenschen im Alltag befragen, selbst solche höheren Bildungsstandes, so stellen wir fest, dass viele nicht über einen physikalisch zutreffenden, sondern nur über einen sehr verschwommenen Begriff von Energie verfügen. Er bewegt sich in einem assoziativen Umfeld von Kraft, Wucht, Schwung, Druck, Arbeit, Leistung, Wärme, Bewegung, Ausdauer, etwas Bleibendes, Konstantes, Depot bis hin zu Entscheidung, bestimmte Richtung, Zielstrebigkeit oder gar innerer Antrieb des Menschen. Dieses Verständnis von Energie in der Bevölkerung entspricht etwa dem Begriffsstand der Physik vor 200 Jahren. Illustriert wird das beispielhaft im Kapitel 11 durch Aneinanderreihung von Zitaten aus verschiedenen Kulturbereichen.

Viele Schüler betrachten Energie etwa, wie Duit schon 1979 zeigte, als *Industrieprodukt*, das uns das Leben schöner und bequemer macht, also als eine Art Luxusartikel, auf den man zur Not auch verzichten kann, und nicht, vor allem in chemischer Form, als unverzichtbare Grundlage des Lebens selbst.

Trotz der seit über 150 Jahren vollzogenen Trennung der Begriffe *Energie* und *Kraft* durch die Physik und trotz des unablässigen Bemühens

der Physiklehrer in Schulen, diese Unterscheidung für die Lernenden einsehbar zu machen, werden beide Begriffe in Alltagsvorstellungen immer noch gleichgesetzt. So äußerte eine 15-jährige Gymnasialschülerin kürzlich wieder in einem Test: „Kraft ist fast wie Energie – beides kann etwas verändern“. Ebenso benutzt der Volksmund immer noch Wörter wie *Kraftwerk* (obwohl dieses keine Kraft liefert, sondern Energie) und *Kraftstoff* (der ebenfalls keine Kraft enthält, sondern Energie).

Im SPIEGEL Special 2007 *Neue Energien – Wege aus der Klimakatastrophe* werden die drei großen Bereiche erneuerbarer Energien mit *Windkraft*, *Fotovoltaik* und *Biomasse* gekennzeichnet, also mit den Oberbegriffen *Kraft*, *Voltaik* und *Masse*. Die hier benutzten Oberbegriffe sind physikalisch falsch und passen nur assoziativ zu dem Gesagten. Das stört aber den Leser nicht, da er ja ohnehin meistens nur assoziativ liest!

Wir sehen: Das Wort Energie ist zwar in aller Munde, bleibt aber bei den meisten Mitbürgern unverstanden, vieldeutig, vage, und es wird vielleicht in breiten Kreisen der Gesellschaft gerade deshalb, wegen dieser Vieldeutigkeit, so sehr geschätzt, – kann man doch dann damit machen, was einem gerade einfällt, und muss sich nicht um Genauigkeit kümmern!

Selbst innerhalb der Physik gab es ja lange Zeit (18./19.Jahrhundert) Meinungsverschiedenheiten darüber, ob der Begriff *Energie* überhaupt Gegenstand der Physik sein könne, da er doch ein *metaphysischer Begriff* sei. Das lag nicht zuletzt an einem allgemeineren, die Physik übersteigenden und sie methodisch doch zentral berührenden Problem, nämlich: ob eine *wissenschaftliche* Beschreibung von Energie immer automatisch naturwissenschaftlich heißen müsse – im Sinne von *objektiv feststellend und messend*. Darüber hinaus ging es dann auch noch um die philosophisch-psychologische Frage, ob Physik den Energiebegriff nur *erklären* müsse oder ob nicht auch noch ein psychologisches *Verstehen* gefragt sei (eine Unterscheidung von Jaspers 1913 [5]; siehe Beitrag v. Engelhardt).

Das berührt dann sogleich die Frage, welche Art des *Verstehens* denn gemeint sei: nur das rationale (kalkülisierende) Verstehen – Domäne der Naturwissenschaften – oder auch das empathische (nach- bzw. einfühlende) Verstehen, das überwiegend in den Geisteswissenschaften zu Hause ist. Dies ist ein generelles Wissenschaftsproblem. Es tritt beim Energiebegriff in besonderer Schärfe auf, begegnet uns aber auch bei vielen anderen Phänomenen, die Gegenstand der Naturwissenschaften geworden sind, z.B. *Kraft*, *Arbeit*, *Zeit*, *Leben*, *Ordnung*, *Information* bis hin zu *Geist* (Thema der Neurowissenschaften).

Das Wort *Energie* bezeichnet offenbar ein geheimnisvolles Phänomen der Natur, das in allen Dingen eine Rolle spielt, die Welt am Laufen hält,

das wir aber begrifflich nicht so recht fassen können, da es uns immer in irgendeiner konkreten Energieform begegnet: als Licht-, Wärme-, mechanische, elektrische, chemische Energie usw., aber nie als *Energie als solche*. Und was das Merkwürdigste ist: Die Energieformen sind alle ineinander umwandelbar; dabei gibt es feste Umrechnungsfaktoren, und bei der Umwandlung *geht nichts verloren*.

Was heißt das aber? Es heißt: Die Summe aller Energieformen in einem abgeschlossenen System ist – nach Umrechnung in eine einzige Maßeinheit, sonst könnte man ja keine Summe bilden! – konstant. Mit anderen Worten: *Energie* (als Ganzes) geht nicht verloren und entsteht auch nicht neu, obwohl die Energieformen innerhalb des Systems immerzu verloren gehen und neu entstehen.



## Kapitel 10

### Verschiedene Sprachkulturen rund um *Energie*

*Gerhard Schaefer*

Was also ist dann diese merkwürdige „Bilanzierungsgröße“ (so wie sie heute genannt wird), die hinter den konkreten Erscheinungsformen unveränderlich existiert und die wir sinnlich nicht fassen, nicht „vorstellen“ können, – so dass selbst der Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman einmal eingestand, es sei wichtig einzusehen, dass die heutige Physik „nicht wisse, was Energie ist“? (Hierzu nimmt G. Berg unten genauer Stellung).

Wenn diese Skepsis schon innerhalb der Physik besteht, wie viel mehr dann außerhalb im täglichen Leben! Anhand der nachfolgenden Zitate (Kapitel 11) wird deutlich, wie Nicht-Physiker unserer heutigen Zeit wie Schriftsteller, Musiker, Psychologen, Physiotherapeuten, ZEN-Meister usw. mit dem Wort Energie umgehen. Es wird dann deutlich, dass wir mitten unter uns, parallel nebeneinander, verschiedene Sprachkulturen haben, von denen die naturwissenschaftliche – hier: die physikalische – nur eine unter vielen ist. In all diesen Sprachkulturen tritt das Wort *Energie* auf, aber in jeweils verschiedener Bedeutung. Das breite Spektrum dieses schillernden Begriffes ist in Abbildung 10.1 in Grundzügen angedeutet.

Dabei ist zur physikalischen Sprach-Variante noch zu bemerken, dass diese in unseren Schulen u.a. auch deshalb Probleme bereitet, weil sie mit einer *Ersatzgröße* bzw. reinen *Rechengröße* arbeitet. Diese ist sinnlich nicht erfahrbar (wir haben keine Sinneszellen für Energie!), sondern als mentales Konstrukt nur denkbar. Solche Größen sind in Abbildung 10.1 mit *M* bezeichnet.

Die physiologisch erfahrbaren (durch spezielle Sinneszellen wahrnehmbaren) Größen sind in der Abbildung mit *P*, die nur seelisch/subjektiv erlebbaren mit *S* bezeichnet.

Links im Schema sind naturwissenschaftlich präzierte Größen untergebracht, rechts einige nicht präzierte Begriffe des Alltags, die auch in den Geisteswissenschaften eine Rolle spielen. Die mit *P+S* gekennzeichneten Größen gehören wegen des *P* eigentlich auch in den Objektbereich der Naturwissenschaften, sind aber wegen noch mangelnder Präzision (Wachs-

tum, Entwicklung, Gesundheit) oder wegen ihrer überwiegend psychologischen Konnotation (z.B. Power) mit auf die rechte Seite gesetzt worden.

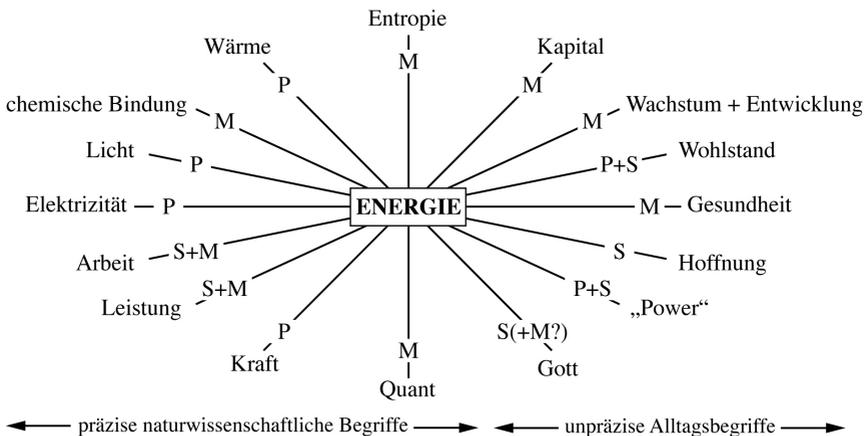


Abbildung 10.1: Der Energiebegriff im Spannungsfeld von Natur- und Geisteswissenschaften

P = physiologische Quelle: direkte Wahrnehmung über spezielle Sinneszellen

M = mentales Konstrukt; Ersatz- bzw. Rechengröße für eine sinnlich nicht wahrnehmbare Größe

S = rein seelisch-subjektive Erfahrung: Gefühls- und Phantasiewelt.

Die hier dargestellte Vielfältigkeit der Wortbedeutungen von Energie hat ihre Wurzel natürlich auch in der Geschichte des Wortes, seiner Etymologie. Die indoeuropäische Wurzel *\*uer-* bedeutete vor etwa 5000 Jahren soviel wie *drehen, wenden, flechten*. Aus ihr haben sich ein griechischer Wortstamm um *uergon* → *ergon* → *en-érgeia*, ein lateinischer um *vertere* und ein germanischer Stamm um Wurm, Werk, wehren gebildet und vielfältig verzweigt (Abbildung 10.2).

In vielen Äußerungen von Mitbürgern erscheint ja Energie auch heute noch als ein Etwas, das in dieser Welt „Dinge von innen heraus dreht und wendet, bewegt und gestaltet“. Das kommt in vielen Zitaten immer wieder zum Ausdruck (siehe Kapitel 11). Physikalisch erscheint diese Sichtweise auch in der in vielen Schulbüchern benutzten Definition „Energie ist gespeicherte Arbeit“, – also so etwas wie *Innen-Arbeit*.

Das Problem bei dieser Definition ist allerdings, dass hier Energie unter einen Oberbegriff *Arbeit* gestellt wird, der nur eine mechanische Erscheinungsform von Energie ist und Energie in ihrer ganzen Weite gar nicht erfasst. Die Definition ist physikalisch irreführend, logisch sogar falsch, da sie einen Oberbegriff (Energie) unter seinen eigenen Unterbegriff (Arbeit) subsumiert. Kein Wunder, dass dann bei Befragung von Mitbürgern immer wieder das Gleiche herauskommt: sie können nicht klar ausdrücken, was Energie ist, und werfen Energie, Arbeit und Kraft ständig durcheinander. Das Wort bleibt für sie bedeutungslos, um nicht zu sagen: bedeutungslos.

Die etymologische Betrachtung in Abbildung 10.2 liefert eine historische Begründung für die ungeheure Bedeutungsvielfalt des Wortes: Energie ist zum Beispiel sprachverwandt mit Werk (engl. *work* = Arbeit), mit Organ (= Werkzeug) und sogar mit Wahrheit (das Eigentliche, das, „was die Welt im Innersten zusammenhält“). Das Wort hat über Jahrtausende hinweg seine große Bedeutungsbreite beibehalten, so wie sie noch in Abbildung 10.1 zum Ausdruck kommt.

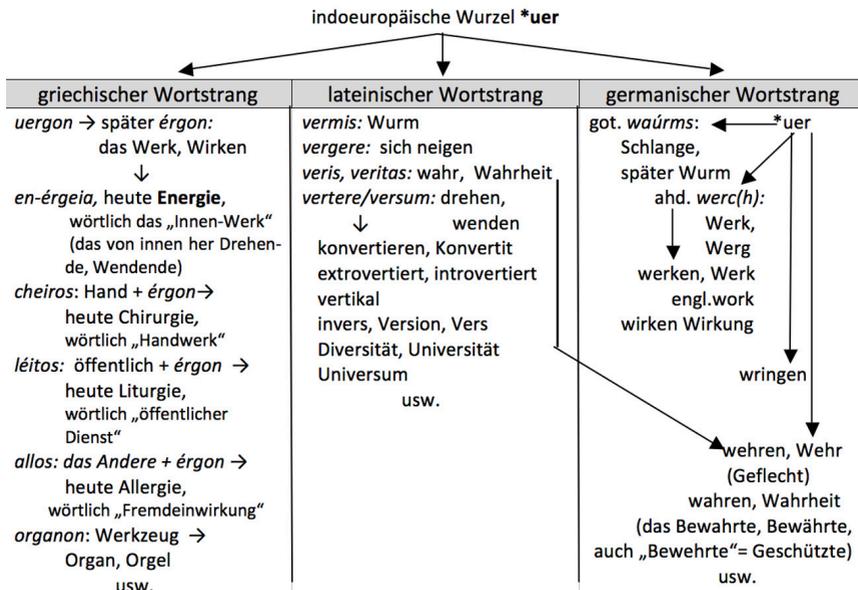


Abbildung 10.2: Etymologie zu Energie (Aus DUDEN 1997 und Kluge 1989)

Wie geheimnisvoll und bedeutungslos der Energiebegriff selbst in der Physik lange Zeit blieb, ist daran zu erkennen, dass er hier – als messbare Größe – erst Mitte des 19. Jahrhunderts eingeführt wurde (1851 W. Thomson, 1853 W. M. Rankine), als er seine Vorstufe, den bis dahin für diese Erhaltungsgröße benutzten Ausdruck *vis viva* (= lebendige Kraft) ablöste. Es scheint, als ob viele heutige Mitbürger – trotz intensiven Physikunterrichts in den Schulen – insgeheim auf der Stufe einer *vis viva* stehen geblieben sind.

Was wir in dieser Situation einer um den Energiebegriff herum bestehenden babylonischen Sprachverwirrung brauchen, und wozu Schule unsere Jugendlichen befähigen sollte: „Dolmetscher“ zwischen den verschiedenen Sprachkulturen zu sein; Dolmetscher, die helfen können, dass wir uns bei der Vielzahl der Energiebegriffe überhaupt noch verstehen. Dazu gehört, dass Jugendliche schon in der Schule die verschiedenen Sprachkulturen – natürlich auch die physikalische – kennen und richtig gebrauchen lernen, so wie ja ein Dolmetscher die Sprachen, die er übersetzen will, auch so weit wie möglich beherrschen muss.

# Kapitel 11

## Zitate zur Anregung der Diskussion

*Gerhard Schaefer*

Im Folgenden werden einige Zitate zusammengestellt, die den Kontrahenten vor der Diskussion bekannt waren und auf die sie z.T. eingegangen sind (siehe Kapitel 12). Sie wurden auch während der Diskussion im Plenum verwendet und werden hier als Anregung für weitere Diskussionen wiedergegeben.

### 11.1 Physik

Richard Feynman (Nobelpreisträger) in *The Feynman Lectures on Physics*: „Es ist wichtig einzusehen, dass die heutige Physik nicht weiß, was Energie ist.“ ([2], Band 1, Seite 4)

Hans-Peter Dürr: Zerrissene Wirklichkeit – An den Grenzen der Wissenschaft; in *raum & zeit 2* (2009), Nr. 2, Themenheft *Energie der Zukunft*: „Die Wissenschaft lebt davon, bestehende Konzepte weiterzudenken, neue Pfade einzuschlagen und alte Strukturen in Frage zu stellen. Insbesondere auf dem Feld der Energie-Forschung wird ‚Neues Denken‘ gebraucht.“

Ludwig Boltzmann 1905: „Der Kampf der Lebewesen um Überleben geht letzten Endes nicht um Energie, sondern um Entropie.“

Werner Heisenberg 1971: Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt; in *Schritte über Grenzen*; Piper, München: „Wir dürfen nicht zugunsten des einen Organs – der rationalen Analyse – alle anderen verkümmern lassen; es kommt vielmehr darauf an, mit allen Organen, die uns gegeben sind, die Wirklichkeit zu ergreifen ...“

### 11.2 Biologie

Irenäus Eibl-Eibesfeldt: Krieg und Frieden aus der Sicht der Verhaltensforschung. Piper, München 1975: „Lorenz sprach ... von aktionsspezifischer Energie, - ein Begriff, der missverständlich ist. Gemeint ist, dass der jeweiligen Verhaltensweise spezifische, spontane (energieproduzierende) Neu-

ronengruppen zugrunde liegen, und nicht, dass verschiedene Sorten von Energie produziert werden.“

### 11.3 Chemie

Robert Schlögl: GDNÄ-Tagung Dresden 2010 *Energie ist Chemie. Katalyse als Schlüsseltechnik*: „Es dürfte nicht sinnvoll sein, weiter auf die enge Verzahnung von Biologie und Energie zu setzen.“

### 11.4 Psychologie

Großes Wörterbuch Psychologie, Compact-Verlag München 2005: „Der Begriff wird in der Psychologie ähnlich wie der Begriff Antrieb gebraucht. Er ist nicht genau definiert... Antrieb: Die Gesamtheit der Impulse bzw. Kräfte, die Aktivität und Handeln auslösen können wie etwa Instinkte, Triebe, Motive oder Strebungen.“

Dorsch *Psychologisches Wörterbuch*, 15. Aufl. 2009: „Gleichbedeutend mit Tatkraft als dem hinter der Tat liegenden Antrieb (Willensantrieb). Kennzeichnend ist dabei die ‚Spannung‘, die die E. verleiht.“ „Durch Freud erfolgte die Übertragung des Energiesatzes in die Psychologie. Danach bleibt die in einem Individuum vorhandene psychische Energie (Libido) über lange Zeitstrecken konstant.“

### 11.5 Musik

*energico* = energisch, kraftvoll, entschlossen, beherzt

### 11.6 Literatur

Wilhelm v. Humboldt in *Sittenverbesserung*: „Meiner Idee nach ist Energie die erste und einzige Tugend des Menschen.“ (Gemeint ist offensichtlich Streben als Tugend, - „Drang weiterzukommen“).

Alice Munro: *Kräfte* (Tricks. Acht Erzählungen). Frankf./M. 2008. „Über was für ernste Themen wurde früher geredet: ‚Ist die Naturwissenschaft oder die Literatur für die Formung des Menschen wichtiger?‘ Kann irgendjemand sich vorstellen, heutzutage die Leute mit so etwas hinter dem Ofen hervorzulocken? Wir kämen uns sogar komisch vor, wenn wir in offener Runde darüber reden würden.“

Novalis: „Der Poet versteht die Natur besser als der wissenschaftliche Kopf.“

### 11.7 Presse

SPIEGEL Special 2007 *Neue Energien – Wege aus der Klimakatastrophe*: „Schlange, Drache oder Schnecke? Wie Ingenieure mit verschiedensten Techniken versuchen, die Kraft von Meereswellen in Strom zu verwandeln.“

### 11.8 Physiotherapie

Unbekannter Therapeut: „Wir müssen die Energieströme wegmassieren und Blockaden aufheben.“

### 11.9 ZEN-Meditation

Eckhart Tolle in *Torwege zum Leben im Jetzt*: „Wenn Du in Deinem Körper zu Hause bist, wurzelst Du in Deinem Sein. Dann bist Du mit Deinem gesamten Energiefeld präsent. ... Du hast ein umfassendes Gefühl der Lebendigkeit. – Das Energiefeld der Lebendigkeit ... öffnet Dir einen Zugang zum Zustand der Gegenwärtigkeit.“

### 11.10 Philosophie, Ethik, Bildung

Dietrich v. Engelhardt 1976: Naturwissenschaft und Bildung in der Geschichte der Neuzeit: „Naturforscher des 19. Jahrhunderts sind insgesamt von der überragenden Bedeutung der Naturwissenschaft für alle Wissenschaften und Künste, für Gesellschaft, Politik und Kultur überzeugt. ... Naturwissenschaften sollen nicht nur der äußeren Lebenserhaltung dienen; Fähigkeiten der Sprache, des Gedächtnisses, der Phantasie, der Beobachtung wie auch sittliches Handeln und ästhetische Neigungen sollen vor allem aus der Naturforschung oder der Aufnahme von Naturerkenntnissen zu gewinnen sein.“ Und weiter: „Naturwissenschaft und Bildung fallen auseinander. Anhaltende Spezialisierung der Naturwissenschaften, fortgesetzte Abwehr von Natur und wissenschaftlichen Naturerkenntnissen in den Geisteswissenschaften und Künsten sowie sich noch weiter ausdehnende Ethisierung der Bildung versprechen keine Änderung.“ [12]

Hubert Markl 2003 (SWR-Vortrag): „Die vermeintlich bedeutsame Frage eines Vorrangs geistes- oder naturwissenschaftlicher Bildung, der ‚einen‘ oder der ‚anderen‘ Kultur, ist tatsächlich eher der Ausweis eines Mangels an Bildung, die solche Bezeichnung verdient, und zugleich ein Streit um Ei oder Huhn, wenn nicht gar um Henne oder Hahn. Damit lassen sich zwar offenkundig Bücher verkaufen, aber das gilt bekanntlich

für Astrologie oder Psychoanalyse genauso und ist kein Beleg für ihren Wahrheitsgehalt.“

Friedrich W.J. v. Schelling 1803: Vorlesungen über die Methode des akademischen Studiums: „Wer sein besonderes Lehrfach nur als besonderes kennt, und nicht fähig ist, weder das Allgemeine in ihm zu erkennen, noch den Ausdruck einer universellen wissenschaftlichen Bildung in ihm niederzulegen, ist unwürdig, Lehrer und Bewahrer der Wissenschaften zu sein. Er wird sich auf vielfache Weise nützlich machen können, als Physiker mit Errichtung von Blitzableitern, als Astronom mit Kalendermachen, als Arzt mit der Anwendung des Galvanismus in Krankheiten oder auf welche andere Weise er will; aber der Beruf des Lehrers fordert höhere als Handwerkertalente.“

Albert Zeyer, Univ. Zürich, Vortrag Berlin 2009: Fatima's Rules – oder: muss der naturwissenschaftliche Unterricht neu gedacht werden? „Die Randzone, das Grenzgebiet der Naturwissenschaften, dort, wo Lebenswelt und naturwissenschaftliche Kultur aufeinanderstoßen, wo nicht-normaler oder informeller Diskurs gefragt ist, muss vermehrt in den Unterricht Einzug halten. Das ist die Region, wo naturwissenschaftliche Bildung gedeiht.“ Und weiter: „Man kann mit Naturwissenschaft die Welt ent-zaubern, und man kann mit ihr die Welt ver-zaubern. Die Wahrheit liegt wohl wie immer dazwischen. Bildung ist, wie der Philosoph John McDowell einmal schrieb, die partielle Rückverzauberung der Welt.“

### **11.11 Schüleräußerungen zum Energiebegriff (Gymnasium, Kl. 10-13)**

„Der Energiebegriff sollte nicht nur naturwissenschaftlich, d.h. physikalisch, aufgefasst, sondern offen gehalten werden auch für Sichtweisen aus anderen Bereichen.“

„Energie ist etwas, wofür man viele Formeln finden kann; doch sie bleibt unserem Verstand so unverständlich wie unser Leben selbst. Sie existiert einfach, so wie wir bestehen.“

„Energie ist die Zutat zur Verwirklichung.“

„Energie ist die treibende Kraft aller Dinge; ihr Vorhandensein ist die Voraussetzung des Lebens.“

„Energie ist der Zustand der Materie, der benötigt wird, um Arbeit, Leistung zu verrichten.“

„Energie ist das Etwas, welches zur Aufrechterhaltung eines geordneten Systems notwendig ist.“

„Energie ist Umwandlung von Arbeit in Wärme.“

„Der Sinn der Kraft ist, Energie zu benutzen.“

„Zum Leben braucht man körperliche und geistige Energie.“

„Energie wird ständig umgewandelt durch das Gesetz der Kräfteverteilung.“

„Um zu leben, braucht man Kraft, Probleme zu überwinden. Das ist das gleiche wie Lebensenergie.“

„Durch Farbe erhält ein Bild Objektivität und es strahlt Energie aus.“



## Kapitel 12

### Reaktionen der zwei Kontrahenten im Streitgespräch

Im Streitgespräch zu dritt, bei dem G. Schaefer als Moderator wirkte, vertrat Dietrich v. Engelhardt, Lübeck/München, als Medizin- und Wissenschaftshistoriker die geisteswissenschaftliche und Gunnar Berg, Halle/Saale, als Physiker die naturwissenschaftliche Sichtweise von Energie.

#### 12.1 Der Begriff *Energie* aus geisteswissenschaftlicher Sicht

*Dietrich v. Engelhardt*

Energie ist ein vielfältiger Begriff, der in allen Wissenschaften, Künsten und auch im realen Leben eine Rolle spielt. Die obige Einleitung von G. Schaefer hat diese Vielfalt mit konkreten Zitaten und vertiefenden Erläuterungen deutlich manifestiert. Keine Wissenschaft, wie auch keine Kunst, kann das Recht auf eine Begriffs- oder Definitionshoheit für Energie beanspruchen. Bereits die in Abbildung 10.2 vorgestellte Etymologie belegt die alle Disziplinen übergreifende Bedeutung des Wortes.

Der Dialog zwischen den Naturwissenschaften und Geisteswissenschaften hat historische Voraussetzungen und bleibt eine Herausforderung bis in die Gegenwart und auch weiterhin in der Zukunft. Ein symbolisches Datum für die Geschichte dieses Dialogs, an das auch an dieser Stelle erinnert sei, bezieht sich auf den 26. April 1336. An diesem Tag bestieg – ob real oder fiktiv – Petrarca den Mont Ventoux in der Provence und war begeistert auf dem Gipfel dieses Berges über die Schönheit der Natur. Als gebildeter Humanist hatte er auch die *Bekenntnisse* des Augustinus mit sich genommen und schlug nun „zufällig“ die Stelle auf, in der der Kirchenvater von der Bewunderung der Menschen für die Sterne, Berge, Flüsse und Meere und von der Gefahr spricht, dass sie sich dabei verlieren oder aufgeben würden (*et relinquunt se ipsos*). Petrarca verschließt beschämt seine Augen vor der äußeren Natur und will sich von nun an nur noch mit der inneren Natur, das heißt mit dem Menschen beschäftigen (*altitudo hominis*).

In den folgenden Jahrhunderten kommt es immer wieder zu Zeugnissen der Trennung und Opposition wie Versuchen der Verbindung, der Betonung von Gemeinsamkeiten - bei allen Unterschieden und Besonderheiten. Philosophen und Naturforscher des Idealismus und der Romantik um 1800 sind von der Identität wie auch Differenz von Natur und Geist und damit aller Wissenschaften überzeugt. Für Schelling ist Natur „sichtbarer Geist“ und Geist „unsichtbare Natur“. Hegel, der von der „Energie des Denkens“ spricht, erinnert an die aristotelische Unterscheidung von Möglichkeit (*dýnamis*, *potentia*), Wirklichkeit (*enérgeia*, *actus*) und Entelechie (*entelécheia*), weist auf ihre Rezeption in der Scholastik des Mittelalters hin und versteht unter Energie „die Tätigkeit, das Verwirklichende, die sich auf sich beziehende Negativität“. Das höchste Wesen, der unbewegte Bewegter oder die absolute Substanz verbinde bei Aristoteles die drei Bestimmungen der *dýnamis*, *enérgeia* und *entelécheia*. Auch in der christlichen Religion sei dieses Verständnis der Energie erhalten geblieben; grundsätzlich oder potentiell sei aber jeder Mensch fähig, das „natürliche Dasein“ in die „übersinnliche Welt“ zu transzendieren: „Diese Fähigkeit ist die *dýnamis* für jene *enérgeia*.“

Der Positivismus des 19. Jahrhunderts (Auguste Comte) will dagegen Physik und Chemie zu den einzig wirklichen Wissenschaften erheben, an dem sich alle anderen Wissenschaften in Methodik und Begrifflichkeit und damit auch ihrem Kausalverständnis zu orientieren haben. Die aristotelischen vier Ursachentypen (Wirkursache, Zielursache, Stoffursache und Formursache) werden im Laufe der Neuzeit allein auf die Wirkursache, die *causa efficiens*, reduziert; die Trennung zwischen den Wissenschaften und Künsten vertieft sich. Charles Darwin gesteht in seinem autobiographischen Rückblick, dass ihn Literatur und Kunst immer mehr anödeten, dass ihm bei der Lektüre von Shakespeare schlecht würde, dass der Verlust dieser kulturellen Neigungen sich allerdings wohl schädlich auf Verstand und Charakter auswirken würden („loss of happiness, injurious to the intellect, to the moral character“).

Der Psychiater und Philosoph Karl Jaspers (1913) [5] wiederum entwickelt den Methodendualismus von „Erklären“ und „Verstehen“ als Brücke zugleich zwischen den Naturwissenschaften und Geisteswissenschaften (s. oben, Beitrag Schaefer): „erklärt“ werden physische Kausalitäten, „verstanden“ seelische Zusammenhänge. In diesem Sinn hatte bereits Wilhelm Dilthey (1894) formuliert: „Die Natur erklären wir, das Seelenleben verstehen wir.“ Große Resonanz findet schließlich Charles Percy Snow mit seinem Essay *Die zwei Kulturen oder die wissenschaftliche Revolution* (1959). Nach Snow trennt ein tiefer Graben des gegenseitigen Unverständnisses und zum

Teil sogar der Feindseligkeit Naturwissenschaftler (*scientists*) und Geisteswissenschaftler (*literary intellectuals*), der sich nicht überwinden ließe.

Die historischen Hintergründe der disziplinären Auseinandersetzungen wie auch Konkurrenzen von Natur- und Geisteswissenschaften können am Energiebegriff bestens demonstriert werden. Dazu hat G. Schaefer oben bereits zahlreiche Beispiele vorgestellt, die von G. Berg im folgenden Beitrag aus physikalischer Sicht erweitert und vertieft werden. Immer wieder zeigen sich dabei auch geisteswissenschaftliche Dimensionen der Naturwissenschaft, da diese als Produkt des menschlichen Bewusstseins insgesamt ja letztlich auch eine *Geisteswissenschaft* ist.

Die wissenschaftshistorische Entwicklung führt von der Antike bis in die Gegenwart. Aristoteles spricht von Energie (*enérgeia* - *érgon*) nicht nur als Ursache der Bewegung, sondern auch der Dauer und Ausdehnung. Nach der Scholastik stammen wichtige Beiträge von Kepler, Leibniz, Johann Bernoulli (Gleichgewicht virtueller Kräfte), J.R. v. Mayer, J.P. Joule, Hermann v. Helmholtz. 1672 versteht Francis Glisson unter *natura energetica* ein immaterielles Vermögen zur Entfaltung von Initiativen. Naturwissenschaftliche Energetik meint die Lehre von der Energie und möglicher Umwandlungen zwischen ihren verschiedenen Formen. „Energetismus“ bezieht Wilhelm Ostwald auf entsprechende Transformationen in physischem wie psychischem Geschehen und setzt sich für einen „energetischen Imperativ“ als sinnvolle Nutzung aller verfügbaren Energie ein („vergeude keine Energie, verwerte sie“).

In der Physiologie ist die Rede von der Deckung des *Energieverbrauchs*, von Energiewechsel, Aufnahme von Energieträgern, Freisetzung und Verbrauch von Energie für bestimmte Leistungen. Im Kraftbegriff sind in früheren Zeiten, so wie auch heute noch in Schüleräußerungen (siehe Kapitel 11.11), nicht selten auch Momente der Energie enthalten; das gilt auch für Kant, Schelling und Hegel in ihren naturphilosophischen Texten.

Das Spektrum, mit dem der Begriff bzw. die Bezeichnung *Energie* in den Wissenschaften, den Künsten und im Alltag auftritt, ist in der Tat groß (siehe Kapitel 9 bis 11) und kann den Dialog oder das Streitgespräch zwischen den Natur- und Geisteswissenschaften auf erhellende Weise stimulieren, kann zu Einsichten in Grenzen wie Gemeinsamkeiten sowie zentrale wissenschafts- und erkenntnistheoretische Prämissen und Problemen führen. Was Wissenschaft, was wissenschaftliche Methode und Sprache ist, kann nicht von einer einzelnen Wissenschaft dekretiert werden, sondern ist im Prinzip eine philosophische Frage, die natürlich nicht ohne Realkenntnisse der Einzelwissenschaften beantwortet werden kann.

In der Musik gibt es zum Beispiel die Bezeichnung *energico* für eine kraftvolle, entschiedene, mit anderen Worten: energische Spielweise. Menschen werden als *dynamisch* und *energisch* bezeichnet – natürlich ohne bewussten Bezug zur antik-philosophischen Bedeutung von Potentialität (*dýnamis*) und Wirksamkeit (*enérgeia*); auch bei der Charakterisierung eines Menschen als *zielstrebig* wird wohl kaum an Finalität (*entelécheia*, *télos*) gedacht. Selbst im Sport spielen diese Begriffe, auch wenn sie zum Teil nur politische Gründe haben, eine Rolle (FC *Dynamo* Dresden, FC *Energie* Cottbus).

In der mittelalterlichen Theologie kann Gott im Unterschied zu Existenz mit Energie identifiziert werden (*enérgeia divines*; vgl. Gott in Abbildung 10.1). Wilhelm v. Humboldt bestimmt Sprache als Energie, sie „ist kein Werk (*Érgon*), sondern eine Tätigkeit (*Enérgeia*). Ihre wahre Definition kann daher nur eine genetische sein. Sie ist nämlich die sich ewig wiederholende Arbeit des Geistes, den artikulierten Laut zum Ausdruck des Gedankens fähig zu machen.“

Der psychophysische Parallelismus vertritt einen Ansatz der Korrelationen, nicht aber der realen oder kausalen Transformationen. Die Theorie der Wechselwirkung differenziert faktisch materielle Einflüsse und Einwirkungen nur auf die Richtung einer Bewegung oder Entwicklung. Unterschieden werden induktiv gewonnene Realgesetze von wissenschaftlichen Fiktionen (Hans Vaihinger, 1911). Energie kann auch mit psychischer Energie, Libido, Willenskraft, sittlicher Kraft in Verbindung gebracht werden (siehe oben, Kapitel 11.4 und 11.6).

Stets stellt sich grundsätzlich die Frage, ob, wenn von *Energie* gesprochen wird, vielleicht Übertragungen aus der Physik oder Biologie vorliegen, oder ob sogar umgekehrt theologische oder philosophische Konzepte und Definitionen Anwendung finden, die ihrerseits dann in den Naturwissenschaften – manchmal ohne bewusste Kenntnis dieser Herkunft – aufgegriffen werden. Entscheidend ist für entsprechende Analysen die Unterscheidung von Phänomen, Differenzierung, Abstraktion, Begriff und Sprache.

Um an den Anfang zurückzukehren: Petrarca's Resignation kann auch im Blick auf Energie nicht akzeptiert werden. Es kommt hierbei sowohl auf Verbindung als auch Unterscheidung an. Die Initiativen der GDNÄ-Bildungskommission orientieren sich mit dem Konzept des *fachübergreifenden Fachunterrichts* an dieser integrierend-differenzierenden Perspektive (siehe die Bildungsrosette, Abbildung 13.3).

Die vielzitierten *zwei Kulturen* (Snow) sollten im Übrigen – nicht zuletzt auch im Blick auf den schulischen Unterricht und die universitäre Ausbildung – auf vier Kulturen erweitert werden: es gibt die Kultur der

Naturwissenschaften, die Kultur der Geisteswissenschaften, die Kultur der Künste und die Kultur des Verhaltens im Alltag. In allen diesen Kulturen besitzt das Wort Energie einen spezifischen Sinn, zugleich handelt es sich aber hierbei doch um einen allgemeinen, die Kulturen übergreifenden Begriff. Im zusammenfassenden Fazit von G. Schaefer (Kapitel 13) wird eine pädagogische Grundlage für das Dolmetschen zwischen diesen Kulturen gelegt (Abbildung 13.1 und 13.2).

## 12.2 Der Begriff *Energie* aus naturwissenschaftlicher Sicht

*Gunnar Berg*

Wie oben schon zitiert, hat sich der Nobelpreisträger Richard Feynman provozierend über Energie geäußert, wenn er schreibt: „Es ist wichtig einzusehen, dass die heutige Physik nicht weiß, was Energie ist.“ Da erhebt sich natürlich als erstes die Frage, ob es die frühere Physik besser wusste. Wohl kaum, denn seit dem 19. Jahrhundert wurde in der Physik der Energiebegriff sowohl qualitativ als insbesondere auch quantitativ immer klarer gefasst. In dieser Absolutheit, wie der Satz isoliert stehend wirkt, kann er nicht zutreffen – schließlich ist Energie heute einer der grundlegenden Begriffe der Physik und damit der gesamten Naturwissenschaften.

Doch muss man natürlich einräumen, dass der Begriff hochabstrakt ist, wie übrigens fast alle grundlegenden Begriffe der Wissenschaften sich der unmittelbaren, anschaulichen Vorstellung entziehen. Der Energiebegriff befindet sich da in guter Gesellschaft: auch für andere thermodynamische Begriffe wie Entropie, Freie Energie und viele andere gibt es kein anschauliches Bild. Das gilt aber auch für Begriffe wie Impuls, Feld und elektrische Ladung. Letzten Endes lässt sich immer nur die Wirkung angeben, die beobachtet wird, wenn das mit dem entsprechenden Begriff bezeichnete Phänomen auftritt.

Haben wir z.B. ein Objekt, zu dessen Eigenschaften eine elektrische Ladung gehört (das mit anderen Worten eine „elektrische Ladung trägt“), so wird auf dieses in einem elektrischen Feld eine Kraft ausgeübt, die sich messen lässt. Aber man hat kein exaktes anschauliches Bild von solchen Größen, eher eine mehr oder weniger zutreffende, an der Alltagserfahrung orientierte *Ahnung*.

Man kann sicher Feynman Recht geben, wenn man das Zitat in folgender Weise abwandelt: „Die heutige Physik – und das heißt natürlich die Physik überhaupt – hat kein anschauliches Bild von einer Größe, die letztendlich alle die Eigenschaften zeigt und alle die Wirkungen hervorruft, die dem physikalischen Begriff Energie eigen sind.“ Aber natürlich ist

dieser Begriff als wissenschaftliche Größe klar, verständlich und eindeutig definiert, so dass man ohne Einschränkungen damit arbeiten und – ein wichtiges Ziel der Naturwissenschaften – das Verhalten auch komplexer Systeme beschreiben und voraussagen kann.

Bei Energie im physikalischen Sinne ist zu betonen, dass es sich hier um eine universelle Erhaltungsgröße handelt, eine Größe, die in allen bisher bekannten Bereichen – allen Teilgebieten der Physik, aber auch bei allen chemischen und bei allen biologischen Vorgängen – erhalten bleibt. Zu beachten ist, dass die Energieerhaltung ein naturwissenschaftliches Grundgesetz ist, das sich nicht logisch bzw. philosophisch begründen und herleiten lässt. Es handelt sich um eine Erfahrungstatsache, die aus der Erfahrung folgt und die durch die Erfahrung bestätigt wird.

Dem widerspricht nicht, dass die Energieerhaltung zwanglos auch aus der Zeitsymmetrie (Zeittranslations-Invarianz, Emmy Noether) folgt, aber auch deren Existenz muss natürlich in der Natur empirisch bestätigt werden.

Um ein Beispiel für die Verletzung dieser Invarianz zu nennen: Wird das betrachtete System z.B. mit einem zunächst beschleunigten und dann verzögerten Fahrstuhl identifiziert, so gilt für dieses System die Zeittranslations-Invarianz nicht, denn es laufen mechanische Vorgänge, wie z.B. der Fall eines Gegenstandes, in den verschiedenen Phasen der Bewegung verschieden ab.

Wird der Fahrstuhl nach oben beschleunigt, so fällt ein Gegenstand, gemessen gegenüber dem Fahrstuhl, schneller als wenn dieser anschließend verzögert wird, d.h. für den Fahrstuhlinnsassen ist eine formal gegenüber dem Boden des Fahrstuhls gemessene *Fallbeschleunigung* des Gegenstandes zeitabhängig, während es sich für uns bezogen auf die Erde um eine Naturkonstante handelt.

Auf das Innere des Fahrstuhls bezogen gilt der Energieerhaltungssatz nicht. Dieser Satz gilt erst, wenn das (umfassendere) System betrachtet wird, in dem sich der Fahrstuhl bewegt. Man kann das auch so ausdrücken, dass ein beschleunigter Fahrstuhl kein abgeschlossenes System ist, auch dann, wenn die Wände so gestaltet sind, dass die Insassen nicht aus dem Fahrstuhl heraus sehen und die Umgebung erkennen können.

Energie als physikalische Größe zeichnet sich dadurch aus, dass sie in vielfältigen Erscheinungsformen auftritt, so dass man mit Wilhelm Ostwald sagen kann: „der Allgemeinbegriff der Energie [ist] abstrakt [...]; die einzelnen Energien dagegen sind durchaus real“ (Mauthner 1923, [7], Seite 414). Abhängig von den untersuchten Phänomenen haben wir mechanische Energie als kinetische und potentielle Energie, daneben Verformungs-

energie, Wärmeenergie, elektromagnetische Energie, Bindungsenergie (oft auch als chemische Energie bezeichnet, da sie meist bei der Änderung von Bindungen infolge chemischer Prozesse in Erscheinung tritt) und weitere Energieformen, meist nach der dominierenden Wechselwirkung bezeichnet, die man sich häufig zumindest in gewisser Annäherung auch anschaulich vorstellen kann.

Das wesentliche Merkmal aller dieser Formen ist, dass sie sich wegen der Gültigkeit des Erhaltungssatzes mit konstanten Umrechnungsfaktoren ineinander umrechnen lassen, denn in der Natur sind sie ineinander umwandelbar – nicht nur ihre Existenz, sondern auch diese Umwandelbarkeit basiert natürlich wieder auf Erfahrungen –, und das funktioniert ohne Verletzung der Erhaltung nur, wenn die Umrechnungsfaktoren unabhängig von Ort und Zeit sind, könnte man doch sonst durch geeignete Wahl von Ort oder Zeit Energie erzeugen oder vernichten.

Die Entdeckung dieser Umwandelbarkeit – und der damit verbundene Erhaltungssatz – erlaubten es, „mehr Einheit als bisher in das Weltgeschehen hineinzudenken“, wie das Mauthner ausdrückt ([7], Seite 409), wodurch auch gekennzeichnet ist, dass es sich um eines der grundlegenden und weitestreichenden Konzepte der Physik und damit der gesamten Naturwissenschaften handelt.

Natürlich ist es sinnvoll, das Feynman-Zitat vollständiger anzusehen, denn auf den eingangs zitierten Satz folgt: „Wir haben kein Bild davon, dass Energie in kleinen Klumpen definierter Größe vorkommt. So ist es nicht. Jedoch gibt es Formeln zur Berechnung einer numerischen Größe, und wenn wir alles zusammenaddieren, ergibt es ... immer die gleiche Zahl.“, was sich natürlich auf die Existenz des Erhaltungssatzes bezieht. Er fährt dann fort: „Es ist eine abstrakte Sache insofern, als es uns nichts über den Mechanismus oder die Gründe für die verschiedenen Formeln mitteilt.“ Unter dem „nicht weiß“ Feynmans ist also nicht zu verstehen, dass die Physik mit dem Begriff Energie nicht umgehen könnte, sondern er drückt nur aus, dass uns eine anschauliche Vorstellung für diese Eigenschaft eines Systems fehlt – natürlich eingeschlossen einzelne Körper als primitivste Systeme –, die der Physiker als „Energie“ bezeichnet und für die er sehr komplexe Messverfahren entwickelt hat.

Ein Hauptziel der Naturwissenschaften ist es, „die massenhaften Tatsachen systematisch zu ordnen“ (Mauthner, [7], Seite 407) und auf dieser Basis Theorien zu entwickeln, die Prognosen bezüglich zukünftiger Ereignisse zulassen. Wenn auch in vergangenen Jahrhunderten versucht wurde, das auf der Basis anschaulicher Vorstellungen zu verwirklichen, so musste doch spätestens seit der Entwicklung von Maxwells Theorie der elektroma-

gnetischen Phänomene eingesehen werden, dass das nur in ganz speziellen Bereichen möglich ist. Wichtiger als Anschaulichkeit ist es seitdem, Theorien zu entwickeln, deren Anwendungsbereich möglichst umfassend ist.

Seitdem mit Relativitätstheorie und Quantentheorie Naturbereiche großer Energien und Geschwindigkeiten sowie sehr kleiner Ausdehnung erreicht wurden, die alle unserer unmittelbaren Sinneserfahrung nicht zugänglich sind, ist es uns selbstverständlich, dass wir in den Naturwissenschaften mit abstrakten Größen umgehen müssen. Aber schon der Energiebegriff als eine ursprünglich nur auf mechanische Phänomene bezogene Größe war auch für diesen begrenzten Bereich nicht anschaulich. Zunächst wurde – siehe obiger Beitrag von G. Schaefer – der vermeintlich anschaulichere Begriff *lebendige Kraft* (*vis viva*) verwendet, da man glaubte, sich eine Kraft anschaulich vorstellen zu können. Doch in der Folge der Auseinandersetzung zwischen Descartes und Leibniz erkannte man, dass bei mechanischen Vorgängen in abgeschlossenen Systemen zwei voneinander verschiedene Größen – der Impuls einerseits und die Energie andererseits, für den bewegten Körper als *kinetische Energie* gemessen – erhalten bleiben.

Die Energieerhaltung wurde im Laufe des 18. Jahrhunderts verallgemeinert und schließlich als 1. Hauptsatz der Thermodynamik eine der Grundlagen dieses Gebietes und damit auch aller mit Lebensvorgängen verbundenen Phänomene. Nebenher erschien die Erhaltung der Masse als nahezu selbstverständlich, war doch niemals das Verschwinden oder gar die „Schaffung“ einer Masse beobachtet worden, bis Einstein im Rahmen der Relativitätstheorie Anfang des 20. Jahrhunderts zeigte, dass bei hohen Energien doch Massenanteile in Energie und umgekehrt Energie in Teilchen umgewandelt werden können. Das berühmte  $E = mc^2$  erlaubte es nun auch, an Wechselwirkungen beteiligte Massen  $m$  in den Energiesatz einzubeziehen, wobei wegen der relativistischen Effekte berücksichtigt werden muss, dass  $m$  von der Geschwindigkeit abhängt.

Die Aussage eines Schülers, die G. Schaefer bei seinen Untersuchungen gesammelt hat (Aussage 4 in Kapitel 11.11), charakterisiert die allgemein verbreitete Vorstellung zur Rolle der Energie ganz gut: „Energie ist die treibende Kraft aller Dinge; ihr Vorhandensein ist die Voraussetzung des Lebens.“ Sieht man das im Sinne einer notwendigen (noch nicht hinreichenden) Bedingung an, dann trifft das auch als wissenschaftliche Aussage zu. Man muss sich nur die Bemerkung Ludwig Boltzmanns von 1905 hin zu denken: „Der Kampf der Lebewesen um Überleben geht letzten Endes nicht um Energie, sondern um Entropie.“ (G. Schaefer, Kapitel 11.1), oder

mit anderen Worten: es geht hierbei um Energie aus Systemen mit hohem Ordnungszustand, das heißt mit geringer Entropie.

Die maximale Arbeit, die ein System der inneren Energie  $U$ , der Temperatur  $T$  und der Entropie  $S$  bei einem isothermen Prozess leisten kann, ist gleich der Freien Energie  $F = U - TS$ , und dieser Anteil an der Gesamtenergie  $U$  des Systems ist umso größer, je kleiner die Entropie  $S$  ist. Mit jeder (irreversiblen) Energieumwandlung wird an irgendeiner Stelle des Systems (der Welt) zwangsläufig die Entropie erhöht, d.h. der Ordnungszustand und damit die Arbeitsfähigkeit verringert. Für das System Erde ist es die Sonne, die Energie mit niedriger Entropie liefert, entsprechend gibt die Erde Energie mit hohem Entropiegehalt in den Weltraum ab (Entropiestrom).

Energie ist also gemeinsam mit der Entropie eine für das praktische Leben unverzichtbare Größe. Ohne Energie im physikalischen Sinn gäbe es kein Leben. Natürlich war der Alltagsbegriff in all seiner Unbestimmtheit und Vieldeutigkeit zuerst da, doch erst die exakte physikalische Definition, die über die Alltagsbedeutung hinaus geht, macht ihn im Sinne von Karl R. Popper zu einem wissenschaftlichen Begriff, der sowohl zur Weltkenntnis als auch zur Weltbeherrschung beiträgt. Die Physik ist seit der Renaissance bei der Entwicklung solcher Begriffe und darauf basierender Theorien beispielgebend, so dass sie eine gewisse Leitfunktion übernommen hat. So modellieren heute z.B. die Sozialwissenschaften viele ihrer Phänomene mit Methoden, die in der Physik entwickelt wurden.

Trotzdem bleibt aber die Tatsache, dass in verschiedenen Bereichen mit verschiedenen *Sprachen* und Begriffssystemen gesprochen wird. Da wandelt nicht nur das Wort *Energie* seine Bedeutung, das gilt auch für viel banalere Ausdrücke. Man denke nur an die Sprache verschiedener Berufsgruppen wie z.B. die der Bergleute oder die der Jäger, aber auch an die Jugendsprache. Jedoch sind die Vertreter des jeweiligen Bereiches, besonders wenn sie den Anspruch erheben, Wissenschaft zu betreiben, gut beraten, ihre Begriffe, so wie die Naturwissenschaften es tun, nachvollziehbar zu definieren und dann auch so zu gebrauchen.

Wenn in Dorsch *Psychologisches Wörterbuch* 2009 davon gesprochen wird (siehe Kapitel 11, 11.4): „Durch Freud erfolgte die Übertragung des Energiesatzes in die Psychologie. Danach bleibt die in einem Individuum vorhandene psychische Energie (*Libido*) über lange Zeitstrecken konstant“, dann sollte man sich auch bemühen, empirisch aufzuzeigen, dass das mehr ist als nur ein metaphorisches Geraune.

Es wäre allerdings unrealistisch anzunehmen, dass der Dialog zwischen Geisteswissenschaften einerseits und Naturwissenschaften andererseits da-

durch befördert wird, dass man sich vorher auf eine gemeinsame Sprache einigt. Man sollte die Sprache des Gesprächspartners zumindest wie eine Fremdsprache kennen – die dafür notwendigen Grundkenntnisse muss die Schule im Sinne von Allgemeinbildung vermitteln; siehe Denkschrift der GDNÄ-Bildungskommission *Allgemeinbildung durch Naturwissenschaften* [10] – und dann die Bereitschaft zeigen, sich auf diese Fremdsprache auch einzulassen.

In den Naturwissenschaften ist unter *Wissen* primär – von eindeutig definierten Grundlagen und Axiomen ausgehend – das Erklären von Phänomenen und die Zurückführung der Vielfalt auf einige wenige Grundsätze gemeint. Den Geisteswissenschaften dagegen geht es, worauf G. Schaefer und D. v. Engelhardt oben schon hinwiesen, mehr um ein (empathisches) Verstehen. Schon aus diesem Grund ist es nicht verwunderlich, dass der Energiebegriff der Physik rational und unanschaulich ist und bleiben muss, während Energie in seiner Alltagsbedeutung, aber auch in den Geistes- und Sozialwissenschaften, stark gefühlsmäßig und mithin emotional geprägt ist, wodurch er aber naturgemäß auch unschärfer wird.

Im geeigneten Kontext, und dort wenigstens minimal präzise verwendet, wird der physikalische Energiebegriff sicher auch Diskussionen außerhalb der Naturwissenschaften befruchten, zumal damit zu rechnen ist, dass in der heutigen naturwissenschaftlich-technisch geprägten Welt, und beeinflusst durch den naturwissenschaftlichen Schulunterricht, doch bei allen Diskussionen immer auch die physikalische Bedeutung im Hintergrund mitschwingt.

## Kapitel 13

### Fazit

*Gerhard Schaefer*

Wenn, wie oben gezeigt, das Wort *Energie* in vielen Bereichen unseres Lebens in jeweils verschiedener Bedeutung auftritt, und wenn sich, worauf D. v. Engelhardt hinwies, unsere Gesamtkultur nicht aus zwei (Snow), sondern aus mindestens vier Subkulturen zusammensetzt, so liegt es nahe, dass man für eine Dolmetscherfunktion wenigstens diese vier Subkulturen so weit verstehen muss, dass man ihre Sprachen kennt und sie sinnvoll ineinander übersetzen kann. *Gebildet* wäre dann ein Mensch, der diese Dolmetscherfähigkeit besitzt.

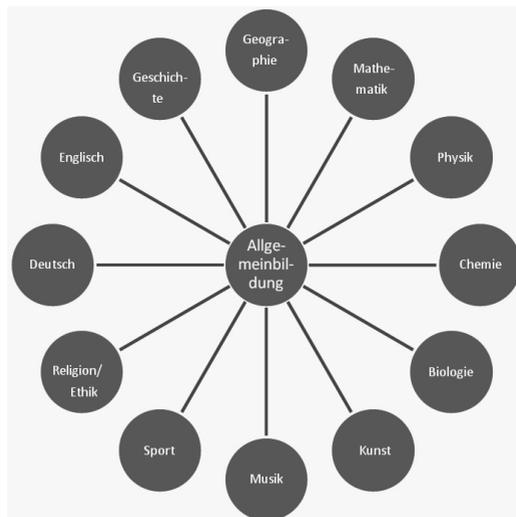


Abbildung 13.1: Konzept I für fachübergreifenden Unterricht: Addition der Schulfächer.

Nun ist es in der heutigen Schule immer noch üblich, die vorhandenen Subkulturen durch verschiedene Fächer repräsentieren zu lassen, die sich darauf jeweils spezialisieren. Das ist das Konzept einer Allgemeinbildung durch Addition von Fächern (Abbildung 13.1).

Wie die Erfahrung zeigt, funktioniert dieses Konzept aber nicht oder nur sehr ungenügend: Schüler und Schülerinnen haben ihre *Lieblingsfächer* und sind selten in der Lage oder gewillt, sich in andere Fächer so weit einzudenken, dass sie zwischen ihnen dolmetschen könnten. Es kommt noch hinzu, dass in der Schule die Spezialisierung der Fächer häufig so weit getrieben wird, dass die Lernenden oft „den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr sehen“.

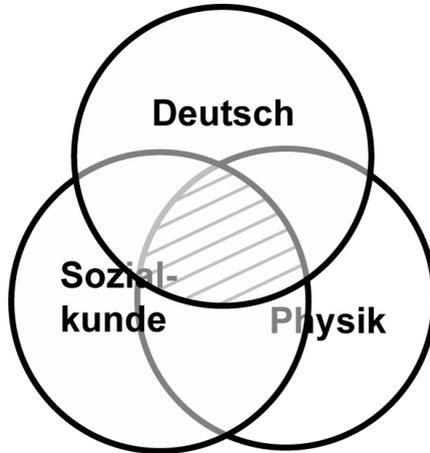


Abbildung 13.2: Konzept II für fachübergreifenden Unterricht: Fachübergreifender *Fachunterricht*. *Integration* der Schulfächer innerhalb jedes Faches. Schwerpunkt ist hier die Überlappungszone im Zentrum der Figur (schraffiert).

Daher verfolgt die GDNÄ-Bildungskommission – D. v. Engelhardt und G. Berg wiesen oben schon darauf hin – ein anderes Konzept: Allgemeinbildung durch Integration verschiedener Fachaspekte innerhalb eines Faches (Abbildung 13.2), genannt *fachübergreifender Fachunterricht*. In einem solchen Unterricht wird versucht, die vorhandenen Subkulturen in jedem einzelnen Fach miteinander zu verknüpfen. So wird Schülern und Schülerinnen Gelegenheit geboten, das *Übersetzen* schon innerhalb des Faches zu üben.

Das Konzept wird zunächst in Abbildung 13.2 am Beispiel der drei weit auseinanderliegenden Fächer Deutsch, Sozialkunde und Physik dargestellt, dann aber in Abbildung 13.3 auf die drei naturwissenschaftlichen Fächer übertragen.

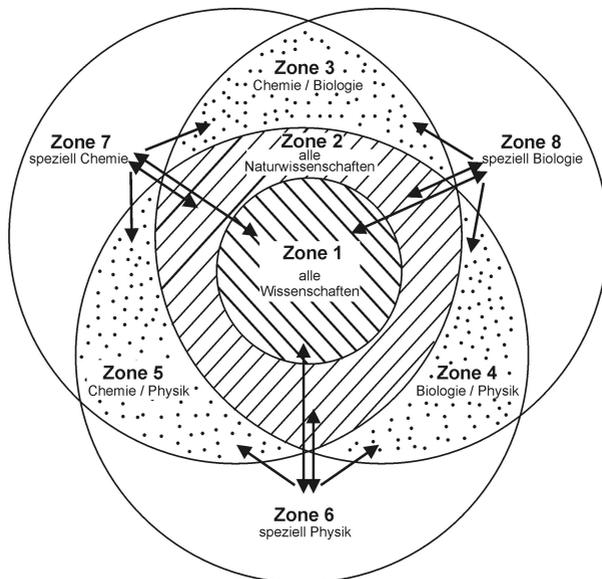


Abbildung 13.3: Anwendung von Konzept II auf die drei naturwissenschaftlichen Fächer: *Bildungсроsette* der GDNÄ

Bei diesem Ansatz kommt dem Zentrum der Rosette (Zone 1) für das Dolmetschen zwischen den Fächern bzw. den von ihnen vertretenen Subkulturen eine herausgehobene Bedeutung zu:

1. dem Beherrschen wichtiger Fundamentalbegriffe wie Struktur, Ordnung, Gesetz, Zufall usw.;
2. der Verfügbarkeit wichtiger Fertigkeiten wie beobachten, beschreiben, definieren, messen, erklären, werten usw.; und
3. der Ausprägung wichtiger Haltungen wie Ehrlichkeit, Genauigkeit, Naturachtung, Wissbegierde, Rationalität, Objektivität, usw.

Diesem Zentrum ist in der GDNÄ-Denkschrift besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Es kann als „Fundament des Dolmetschens“ angesehen werden.

Wenn Schule es schaffen sollte, die Lernenden mit dieser Mitgift auszustatten, wird sie Menschen ins Leben entlassen, die zwischen den verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen vermitteln und damit zum Zusammenhalt unserer Kultur beitragen können. Sie werden dann auch in der Lage sein (und vielleicht sogar Freude daran haben), das Wort *Energie* in seiner Vieldeutigkeit zu sehen, zu schätzen, zu verstehen und dabei auch den physikalischen Begriff entsprechend würdigen und richtig anwenden zu können, – selbst wenn Physik nicht ihr Lieblingsfach sein sollte.

Mögen sich die Schulen der Zukunft bald von dem Zwang eines immer härter werdenden internationalen Wetttragens auf dem Wissens-Sektor befreien und sich auf diese eigentliche, zentrale Bildungsaufgabe konzentrieren!

*Bildung heißt nicht, dass man in einem Fach viel weiß, sondern dass man zwischen den verschiedenen Fachkulturen zu dolmetschen vermag.*

## Literatur

- [1] J. Albrecht, ed., *Energeia und ergon. Sprachliche Variation – Sprachgeschichte – Sprachtypologie*. Tübingen: Narr, 1988.
- [2] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics. Commemorative Issue, Vol. 1*. San Francisco: Addison Wesley, 1971.
- [3] G. W. F. Hegel, *Vorlesungen über die Geschichte der Philosophie, Bd. 2, Sämtliche Werke, Bd.18*. Stuttgart: Suhrkamp, 1965.
- [4] M. Jammer, “Energie,” in *Historisches Wörterbuch der Philosophie* (J. Ritter, ed.), vol. 2, p. 494–499, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1972.
- [5] K. Jaspers, *Allgemeine Psychopathologie*. Berlin: Springer, 1913, 9. Aufl. 1975.
- [6] J. Langlet and G. Schaefer, *Einstellungen zu den Naturwissenschaften und naturwissenschaftlich relevante Haltungen bei deutschen und japanischen Jugendlichen. Eine neue Perspektive zur PISA-Debatte*. Frankfurt/M: Peter Lang, 2008.
- [7] F. Mauthner. *Wörterbuch der Philosophie*, 1. Band, 1923.

- [8] G. Schaefer, “Energetik–Kybernetik,” in *Naturerscheinung Energie. Leitthemen 1/77* (K. Wenk and G. Trommer, eds.), p. 204–217, Braunschweig: Westermann, 1977.
- [9] G. Schaefer, “Naturwissenschaftlicher Unterricht auf dem Wege vom exklusiven zum inklusiven Denken,” *MNU*, vol. 37, no. 6, p. 324–335, 1984.
- [10] G. Schaefer, ed., *Allgemeinbildung durch Naturwissenschaften. Denkschrift der GDNÄ–Bildungskommission*. Köln, Bad Honnef: Aulis, GDNÄ, 2007.
- [11] G. Schaefer, ed., *Allgemeinbildung durch Naturwissenschaften. Denkschrift der GDNÄ–Bildungskommission. Kurzfassung in Deutsch und Englisch*. Freising, Bad Honnef: Aulis/Stark, GDNÄ, 2010.
- [12] D. von Engelhardt, “Naturwissenschaft und Bildung in der Geschichte der Neuzeit,” *Heidelberger Jahrbücher*, vol. 20, p. 151–167, 1976.