

# ERNEUERBARE ENERGIEQUELLEN UND DIE MINDERUNG DES KLIMAWANDELS

ZUSAMMENFASSUNG FÜR POLITISCHE ENTSCHEIDUNGSTRÄGER

SONDERBERICHT

ipcc



# Sonderbericht über Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels

## Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

### **Ottmar Edenhofer**

Ko-Vorsitzender Arbeitsgruppe III  
Potsdam-Institut für Klimafolgen-  
forschung (PIK)

### **Ramón Pichs-Madruga**

Ko-Vorsitzender Arbeitsgruppe III  
Centro de Investigaciones  
de la Economía Mundial (CIEM)

### **Youba Sokona**

Ko-Vorsitzender Arbeitsgruppe III  
African Climate Policy Centre,  
United Nations Economic  
Commission for Africa (UNECA)

**Kristin Seyboth**

**Patrick Matschoss**

**Susanne Kadner**

**Timm Zwickel**

**Patrick Eickemeier**

**Gerrit Hansen**

**Steffen Schlömer**

**Christoph von  
Stechow**

Geschäftsstelle Arbeitsgruppe III  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Deutsche Übersetzung herausgegeben von



## **Deutsche Übersetzung**

Als UN-Gremium veröffentlicht der IPCC seine Berichte nur in den sechs offiziellen UN-Sprachen (Arabisch, Chinesisch, Englisch, Französisch, Russisch, Spanisch). Diese Übersetzung der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger des IPCC Sonderberichtes über Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels ist deshalb keine offizielle Veröffentlichung des IPCC. Sie wurde von der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle mit dem Ziel erstellt, die im Originaltext verwendete Sprache angemessen wiederzugeben.

## **Zitierweise der deutschen Übersetzung:**

IPCC, 2011: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: IPCC Sonderbericht über Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (Hrsg.)], Cambridge University Press, Cambridge, Vereinigtes Königreich und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2014.

## **Deutsche Übersetzung herausgegeben von:**

Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle  
Projektträger im DLR, Umwelt, Kultur, Nachhaltigkeit  
Heinrich-Konen-Straße 1, 53227 Bonn  
Email: [info@de-ipcc.de](mailto:info@de-ipcc.de)

## **Bezug von Übersetzungen**

Kostenfreie elektronische Kopien (PDF) der deutschen Übersetzung können von der Webseite der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle ([www.de-ipcc.de](http://www.de-ipcc.de)) heruntergeladen werden. Kostenfreie Kopien der Druckversion sind bei der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle erhältlich.

Übersetzungen in alle UNO-Sprachen stehen auf [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) zum Herunterladen zur Verfügung oder können in Papierform vom IPCC-Sekretariat (Adresse: 7bis Avenue de la Paix, C.P. 2300, CH- 1211 Geneva 2, Schweiz, Email: [ipcc-sec@wmo.int](mailto:ipcc-sec@wmo.int)) bezogen werden.

## **Finanzierung der deutschen Übersetzung**

Deutsches Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, [www.bmbf.de](http://www.bmbf.de))  
Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und und Reaktorsicherheit (BMUB, [www.bmub.de](http://www.bmub.de))

## **Übersetzung**

Tobias Brokmeier unter Mitwirkung von Andreas Baumgärtner, Thomas Bruckner, Patrick Eickemeier, Britt Erleben, Manfred Fishedick, Uwe R. Fritsche, Susanne Kadner, Volker Krey, Ole Langniß, Werner Niederle, Reinhard Herbener, Dirk Osiek, Janette Pabst, Mark Gropius, Heidi Schulte und Christiane Textor

## **Druckerei**

M & E Druckhaus, Belm

Bonn, November 2014

# Inhalt

**Abschnitt I**

**Geleitwort** ..... ix  
**Vorwort** ..... xi

**Abschnitt II**

**Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger** ..... 3



# Geleitwort und Vorwort

## Geleitwort

Der IPCC-Sonderbericht über Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels (Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, SRREN) bietet einen umfassenden Überblick über diese Energiequellen und Technologien, relevante Kosten und Nutzen und ihre potenzielle Rolle in einem Portfolio von Optionen des Klimaschutzes.

Erstmals bestätigt eine umfassende Aufstellung von Kosten und Treibhausgasemissionen verschiedener Technologien und Szenarien die zentrale Rolle erneuerbarer Energien, unabhängig von jeglichen Klimaschutzabkommen.

Im Jahr 1988 als zwischenstaatliche Organisation von der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) gegründet, hat der IPCC in der Folgezeit politischen Entscheidungsträgern erfolgreich die angesehensten und objektivsten wissenschaftlichen und technischen Assessments geliefert, die, obwohl eindeutig politikrelevant, nie den Anspruch erhoben haben, Politik-präskriptiv zu sein. In einer Zeit, in der Regierungen über die Rolle erneuerbarer Energien im Rahmen ihrer jeweiligen Klimaschutzbemühungen nachdenken, sollte dieser Sonderbericht als besonders bedeutsam erachtet werden.

Der SRREN wurde dank des Einsatzes und Engagements Hunderter von Experten aus verschiedenen Weltregionen und Fachrichtungen möglich. Wir möchten Prof. Ottmar Edenhofer, Dr. Ramón Pichs-Madruga und Dr. Youba Sokona, unter deren unermüdlicher Leitung der SRREN entstanden ist, unseren aufrichtigen Dank aussprechen. Wir danken auch allen Koordinierenden Leitautoren, Leitautoren, Beitragenden Autoren, Begutachtungsgutachtern und Begutachtern sowie den Mitarbeitern der Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe III.

Wir schätzen die großzügige Unterstützung und das Engagement Deutschlands für den SRREN außerordentlich. Insbesondere danken wir für die Förderung der Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe III. Darüber hinaus gilt unser Dank den Vereinigten Arabischen Emiraten, die die Plenarsitzung zur Verabschiedung des Berichts ausrichteten, sowie Brasilien, Norwegen, Großbritannien und Mexiko, die Gastgeber der Leitautorentreffen während des Schreibprozesses waren. Unser Dank gilt auch allen Sponsoren, die zur Arbeit des IPCC mit finanzieller und logistischer Unterstützung beigetragen haben. Schließlich danken wir dem IPCC-Vorsitzenden, Herrn Dr. R. K. Pachauri, für seine Leitung des IPCC während des Entstehungsprozesses des SRREN.

M. Jarraud  
Generalsekretär  
Weltorganisation für Meteorologie

A. Steiner  
Exekutivdirektor  
Umweltprogramm der Vereinten Nationen

## Vorwort

Der Sonderbericht über Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels (Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, SRREN) der IPCC-Arbeitsgruppe III ist ein Assessment und eine sorgfältige Analyse von Technologien für erneuerbare Energien und ihrer gegenwärtigen und künftig möglichen Rolle bei der Minderung von Treibhausgasemissionen. Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf einer umfangreichen Sichtung und Bewertung wissenschaftlicher Literatur. Dabei sind Besonderheiten einzelner Studien ebenso berücksichtigt wie studienübergreifende Zusammenstellungen, die für allgemeinere Schlussfolgerungen analysiert wurden. Der Bericht verbindet Informationen aus technologiespezifischen Studien mit Ergebnissen groß-skaliger integrierter Modelle und bietet Entscheidungsträgern politisch relevante Informationen (ohne politische Empfehlungen zu geben) über Eigenschaften und technische Potenziale verschiedener Ressourcen, über die historische Entwicklung der Technologien, über Herausforderungen ihrer Integration und soziale und umweltbezogene Folgen ihrer Verwendung sowie einen Vergleich der spezifischen Energiegestehungskosten von kommerziell verfügbaren erneuerbaren Technologien und den derzeitigen Kosten für nicht-erneuerbare Energien. Zudem geben die Betrachtungen der Bedeutung erneuerbarer Energien für die Erreichung von in diesem Bericht diskutierten Stabilisierungsniveaus der Treibhausgaskonzentrationen sowie die Beschreibung und Analyse verfügbarer Politikmaßnahmen zur Unterstützung von Entwicklung und Einsatz Erneuerbarer-Energie-Technologien für den Klimaschutz und/oder für andere Ziele wichtige Antworten auf die Fragen, die im ursprünglichen Konzept dieses Berichts ausgeführt sind.

### Der Prozess

Dieser Bericht wurde entsprechend der Regeln und Verfahren des IPCC verfasst, die bereits bei vorherigen Sachstandsberichten angewendet wurden. Nach einem Scoping-Treffen in Lübeck, Deutschland (20. bis 25. Januar 2008) wurde die Struktur des Berichtes bei der 28. IPCC-Plenarsitzung in Budapest, Ungarn, (9. bis 10. April 2008), verabschiedet. Bald darauf wurde ein Autorenteam von 122 Leitautoren (davon 33 aus Entwicklungsländern, 4 aus Schwellenländern und 85 aus Industrieländern), 25 Begutachtungsedatoren und 132 Beitragenden Autoren gebildet.

Gemäß des IPCC-Begutachtungsverfahrens wurden die von den Autoren erstellten Entwürfe in einem zweistufigen Prozess begutachtet. 24.766 Kommentare von mehr als 350 Experten, von Regierungen und internationalen Organisationen wurden berücksichtigt. Begutachtungsedatoren für jedes Kapitel haben sichergestellt, dass alle substanziellen Kommentare von Regierungen und Sachverständigen angemessen berücksichtigt wurden.

Bei der 11. Arbeitssitzung der Arbeitsgruppe III in Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate (vom 5. bis 8. Mai 2011) wurde die Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger Zeile für Zeile verabschiedet und der endgültige Berichtsentwurf angenommen. Der vollständige Sonderbericht wurde bei der 33. IPCC-Plenarsitzung, ebenfalls in Abu Dhabi (vom 10. bis zum 13. Mai 2011), angenommen.

### Struktur des Sonderberichtes

Die Kapitel des SRREN fallen in drei Kategorien: ein einleitendes Kapitel, sechs technologiespezifische Kapitel (Kapitel 2-7) und vier Kapitel, die technologieübergreifend integrative Themen behandeln (Kapitel 8-11).

Im einleitenden ersten Kapitel werden Technologien für erneuerbare Energien in den größeren Zusammenhang von Klimaschutzoptionen gestellt und gemeinsame Merkmale Erneuerbarer-Energie-Technologien identifiziert.

Die Technologiekapitel (2-7) geben für jede der erneuerbaren Energiequellen Auskunft über verfügbare Ressourcenpotenziale, über den Stand der technologischen und marktwirtschaftlichen Entwicklung sowie über die umweltbezogenen und sozialen Folgen der Nutzung. Es werden Bioenergie, direkte Solarenergie, Erdwärme, Wasserkraft, Meeres- und Windenergie betrachtet. Darüber hinaus werden Perspektiven



zukünftiger technologischer Innovationen und Kostensenkungen diskutiert. Die Kapitel schließen mit einer Diskussion der potentiellen künftigen Einsatz- und Ausbaumöglichkeiten.

Kapitel 8 ist das erste der Technologie-übergreifenden Kapitel. Darin wird erörtert, wie Technologien für erneuerbare Energien derzeit in Energieverteilungssysteme integriert sind und wie sie in Zukunft integriert werden könnten. Entwicklungspfade für die strategische Nutzung von erneuerbaren Technologien in den Sektoren Verkehr, Gebäude, Industrie und Landwirtschaft werden ebenfalls diskutiert.

Erneuerbare Energien im Kontext der nachhaltigen Entwicklung werden in Kapitel 9 behandelt. Dazu gehören auch die sozialen, umweltbezogenen und wirtschaftlichen Auswirkungen von erneuerbaren Energien, einschließlich des Potenzials für einen verbesserten Zugang zu Energie und für eine sichere Energieversorgung. Spezifische Hemmnisse für erneuerbare Energien werden ebenfalls behandelt.

Anhand einer Bewertung von über 160 Szenarien untersucht Kapitel 10, wie Technologien für erneuerbare Energien zu unterschiedlichen Szenarien der Reduzierung von Treibhausgasemissionen beitragen können, von Business-as-usual-Szenarien bis hin zu ehrgeizigen Stabilisierungsniveaus von Treibhausgaskonzentrationen. Vier Szenarien werden eingehend analysiert und die Kosten für einen weitreichenden Einsatz von Technologien für erneuerbare Energien werden diskutiert.

Das letzte Kapitel des Berichts, Kapitel 11, beschreibt die aktuellen Trends im Bereich politischer Maßnahmen zur Förderung von erneuerbaren Energien sowie Trends der Finanzierung und der Investitionen im Bereich Erneuerbare-Energie-Technologien. Es analysiert die bisherigen Erfahrungen mit EE-Politikmaßnahmen einschließlich Effektivitäts- und Effizienzmaßnahmen und diskutiert den Einfluss eines förderlichen Umfelds auf den Erfolg politischer Maßnahmen.

Die Autoren des Berichts berücksichtigten die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung neueste Literatur. Den Lesern sollte jedoch bewusst sein, dass sich die in diesem Sonderbericht betrachteten Themenfelder rasant weiterentwickeln können. Dies betrifft den Entwicklungsstand einiger Technologien sowie den Wissensstand über Herausforderungen der Integration, Kosten für Emissionssenkung, positive Nebeneffekte, umweltbezogene und soziale Folgen, politische Ansätze und Finanzierungsoptionen. Die dargestellten Grenzen und Bezeichnungen der geografischen Karten in diesem Bericht bedeuten keine offizielle Billigung oder Anerkennung durch die Vereinten Nationen. In den für den SRREN entwickelten geografischen Karten stellt die gestrichelte Linie in Jammu und Kaschmir in etwa die von Indien und Pakistan vereinbarte Demarkationslinie dar. Über den endgültige Status von Jammu und Kaschmir besteht noch keine Vereinbarung zwischen den beteiligten Ländern.

## Danksagungen

Die Erstellung dieses Sonderberichtes war ein sehr umfangreiches Unterfangen, bei dem zahlreiche Personen aus der ganzen Welt auf vielfältige Weise mitgewirkt haben. Wir möchten den beteiligten Regierungen und Institutionen für ihre großzügigen Beiträge danken, die es Autoren, Begutachtungse editoren, Regierungs- und Expertengutachtern ermöglichten, an diesem Prozess teilzunehmen.

Wir sind besonders dankbar für den Beitrag und die Unterstützung der deutschen Regierung, insbesondere des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), für die Finanzierung der Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe III (Technical Support Unit, TSU). Als Koordinatoren dieser Fördermaßnahme standen Gregor Laumann und Christiane Textor vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) dem Team stets mit Zeit und Engagement zur Seite. Wir möchten auch unsere Dankbarkeit gegenüber dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) zum Ausdruck bringen. Die TSU ist am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) angesiedelt, das freundlicherweise Büros zur Verfügung stellte.



Wir möchten den Regierungen von Brasilien, Norwegen, Großbritannien und Mexiko sehr herzlich danken, die in Zusammenarbeit mit Institutionen vor Ort die wichtigen Leitautorentreffen in Sao Jose dos Campos (Januar 2009), Oslo (September 2009), Oxford (März 2010) und Mexiko-Stadt (September 2010) ausrichteten. Darüber hinaus möchten wir der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und dem Institute for Sustainability, mit dem Founder Society Technologies for Carbon Management Project für die Ausrichtung des Treffens zur Expertenbegutachtung des SRREN in Washington DC (Februar 2010) danken. Schließlich gilt unser Dank dem PIK, das Gastgeber einer abschließenden Sitzung der Koordinierenden Leitautoren des SRREN (Januar 2011) war.

Dieser Sonderbericht konnte nur verwirklicht werden dank der Expertise, der harten Arbeit und des steten Einsatzes im Streben nach Exzellenz unserer Koordinierenden Leitautoren und Leitautoren und mit wesentlicher Unterstützung vieler Beitragender Autoren. Ebenfalls möchten wir unsere Wertschätzung der Regierungs- und Expertengutachter ausdrücken, die Zeit und Engagement aufwendeten für konstruktive und nützliche Kommentare zu den verschiedenen Entwürfen des Berichts. Auch unsere Begutachtungsgutachter haben entscheidend zum Erfolg des SRREN-Prozesses beigetragen, indem sie das Autorenteam bei der Bearbeitung der Kommentare unterstützten und eine objektive Behandlung relevanter Themen gewährleisteten.

Wir freuen uns, die unermüdliche Arbeit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe III, Patrick Matschoss, Susanne Kadner, Kristin Seyboth, Timm Zwickel, Patrick Eickemeier, Gerrit Hansen, Steffen Schloemer, Christoph von Stechow, Benjamin Kriemann, Annegret Kuhnigk, Anna Adler und Nina Schütz zu würdigen, die von Marilyn Anderson, Lelani Arris, Andrew Ayres, Marlen Goerner, Daniel Mahringer und Ashley Renders unterstützt wurden. Brigitte Knopf gab in ihrer Rolle als Senior Advisor der TSU stets wertvolle Hinweise und Orientierung. Unser Dank gilt Kay Schröder und seinem Team von Daily-Interactive.com Digitale Kommunikation für die Unterstützung beim Grafikdesign sowie Valarie Morris und ihrem Team von Arroyo Writing, LLC für die Umsetzung des Layouts.

Die Mitglieder des Vorstands der Arbeitsgruppe III – Antonina Ivanova Boncheva (Mexiko), Carlo Carraro (Italien), Suzana Kahn Ribeiro (Brasilien), Jim Skea (UK), Francis Yamba (Sambia) und Taha Zatari (Saudi-Arabien) und bis zu seiner Ernennung zum IPCC Vice Chair auch Ismail A. R. Elgizouli (Sudan) – unterstützten die Ko-Vorsitzenden der Arbeitsgruppe III während des gesamten SRREN-Prozesses kontinuierlich und konstruktiv.

Wir möchten auch Renate Christ, der Leiterin des IPCC-Sekretariats und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Sekretariats Gaetano Leone, Mary Jean Burer, Sophie Schlingemann, Judith Ewa, Jesbin Baidya, Joelle Fernandez, Annie Courtin, Laura Biagioni, Amy Smith Aasdam und Rockaya Aidara danken, die logistische Unterstützung für die Verbindung zu den Regierungen und für Reisen von Experten aus Entwicklungs- und Schwellenländern zur Verfügung stellten.

Unser besonderer Dank gilt Dr. Rajendra Pachauri, dem Vorsitzenden des IPCC, für seinen Beitrag und seine Unterstützung bei der Erstellung dieses IPCC-Sonderberichts.

Ottmar Edenhofer  
Ko-Vorsitzender IPCC AG III

Ramon Pichs-Madruga  
Ko-Vorsitzender IPCC AG III

Youba Sokona  
Ko-Vorsitzender IPCC AG III

Patrick Matschoss  
Leiter der Geschäftsstelle IPCC AG III

Kristin Seyboth  
Senior Scientist IPCC AG III  
SRREN-Manager

Dieser Bericht ist gewidmet

**Wolfram Krewitt, Deutschland**  
**Koordinierender Leitautor von Kapitel 8**

Wolfram Krewitt verstarb am 8. Oktober 2009. Er arbeitete am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart, Deutschland.

**Raymond Wright, Jamaica**  
**Leitautor von Kapitel 10**

Raymond Wright verstarb am 7. Juli 2011. Er arbeitete für die Petroleum Corporation of Jamaica (PCJ) in Kingston, Jamaika.

Wolfram Krewitt lieferte einen wesentlichen Beitrag zu diesem Sonderbericht und seine Vision für Kapitel 8 (Integration erneuerbarer Energien in heutige und zukünftige Energiesysteme) ist eingebettet in den Text, was wir ausdrücklich anerkennen möchten. Raymond Wright war ein tragendes Mitglied des Autorenteam von Kapitel 10 (Minderungspotenzial und Kosten) und trug stets mit genauen Einblicken zum Sonderbericht bei, was Ausgewogenheit und Glaubwürdigkeit sicherstellte. Beide Autoren waren talentierte, begabte und engagierte Mitglieder des IPCC-Autorenteam – ihr Tod ist ein großer Verlust für die internationale wissenschaftliche Gemeinschaft, die sich mit Klima- und Energiefragen befasst. Wolfram Krewitt und Raymond Wright werden ihren Mitautoren in bester Erinnerung bleiben.



# Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

# SPM

## Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

### **Koordinierende Leitautoren:**

Ottmar Edenhofer (Deutschland), Ramón Pichs-Madruga (Kuba),  
Youba Sokona (Äthiopien/Mali), Kristin Seyboth (Deutschland/USA)

### **Leitautoren:**

Dan Arvizu (USA), Thomas Bruckner (Deutschland), John Christensen (Dänemark),  
Helena Chum (USA/Brasilien) Jean-Michel Devernay (Frankreich), Andre Faaij  
(Niederlande), Manfred Fischedick (Deutschland), Barry Goldstein (Australien), Gerrit  
Hansen (Deutschland), John Huckerby (Neuseeland), Arnulf Jäger-Waldau (Italien/  
Deutschland), Susanne Kadner (Deutschland), Daniel Kammen (USA), Volker Krey  
(Österreich/Deutschland), Arun Kumar (Indien), Anthony Lewis (Irland), Oswaldo  
Lucon (Brasilien), Patrick Matschoss (Deutschland), Lourdes Maurice (USA), Catherine  
Mitchell (Vereinigtes Königreich), William Moomaw (USA), José Moreira (Brasilien),  
Alain Nadai (Frankreich), Lars J. Nilsson (Schweden), John Nyboer (Kanada), Atiq  
Rahman (Bangladesch), Jayant Sathaye (USA), Janet Sawin (USA), Roberto Schaeffer  
(Brasilien), Tormod Schei (Norwegen), Steffen Schlömer (Deutschland), Ralph Sims  
(Neuseeland), Christoph von Stechow (Deutschland), Aviel Verbruggen (Belgien),  
Kevin Urama (Kenia/Nigeria), Ryan Wiser (USA), Francis Yamba (Sambia), Timm  
Zwicker (Deutschland)

### **Sonderberater:**

Jeffrey Logan (USA)

### **Zitierweise des englischen Originals:**

IPCC, 2011: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and  
Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss,  
S. Kadner, T. Zwicker, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge  
University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

### **Englisches Original herausgegeben von:**

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP  
(Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)



## Inhaltsverzeichnis

1.	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
2.	<b>Erneuerbare Energie und Klimawandel</b> .....	<b>7</b>
3.	<b>Technologien und Märkte für erneuerbare Energien</b> .....	<b>8</b>
4.	<b>Integration in heutige und künftige Energiesysteme</b> .....	<b>17</b>
5.	<b>Erneuerbare Energie und nachhaltige Entwicklung</b> .....	<b>20</b>
6.	<b>Minderungspotenziale und Kosten</b> .....	<b>23</b>
7.	<b>Politikmaßnahmen, Umsetzung und Finanzierung</b> .....	<b>27</b>
8.	<b>Erweiterung des Kenntnisstands über erneuerbare Energie</b> .....	<b>29</b>

# 1. Einleitung

Der von der Arbeitsgruppe III erstellte Sonderbericht „Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels“ (Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation – SRREN) begutachtet den Sachstand der Literatur über die wissenschaftlichen, technologischen, umweltbezogenen, ökonomischen und sozialen Aspekte des Beitrags von sechs Quellen Erneuerbarer Energien (EE) zur Minderung des Klimawandels. Damit sollen politikrelevante Informationen für Regierungen, zwischenstaatliche Prozesse und weitere interessierte Gruppen bereitgestellt werden. Die vorliegende „Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger“ bietet einen Überblick über den SRREN und fasst die wesentlichen Befunde zusammen.

Der SRREN besteht aus elf Kapiteln: Kapitel 1 stellt den Kontext zu EE und Klimawandel dar, die Kapitel 2 bis 7 informieren über sechs EE-Technologien und die Kapitel 8 bis 11 behandeln integrative Themenkomplexe (siehe Abbildung SPM.1).



**Abbildung SPM.1** | Struktur des SRREN [Abbildung 1.1, 1.1.2]

Verweise auf Kapitel und Abschnitte sind durch entsprechende Nummerierungen in eckigen Klammern kenntlich gemacht. In dieser Zusammenfassung verwendete Fachbegriffe, Abkürzungen und chemische Symbole werden im Glossar des SRREN (Anhang I) erklärt. Konventionen und Methodiken zur Bestimmung von Kosten, Primärenergie und anderen analytischen Fragestellungen werden in den Anhängen II und III beschrieben. Relevante Unsicherheiten sind in diesem Bericht kenntlich gemacht.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unsicherheiten werden in diesem Bericht beispielsweise dadurch kenntlich gemacht, dass die Ergebnisse von Sensitivitätsanalysen ausgewiesen und Bandbreiten von bezifferten Kosten sowie Bandbreiten von Szenarien quantitativ dargestellt werden. Dieser Bericht verwendet nicht die offizielle IPCC-Terminologie für Unsicherheiten, weil die betreffenden IPCC-Richtlinien zum Zeitpunkt der Verabschiedung dieses Berichts noch überarbeitet wurden.



## 2. Erneuerbare Energie und Klimawandel

**Der Bedarf an Energie und zugehörigen Dienstleistungen für soziale und wirtschaftliche Entwicklung und für die Verbesserung von Wohlergehen und Gesundheit des Menschen steigt.** Alle Gesellschaften benötigen Energiedienstleistungen für grundlegende Bedürfnisse des Menschen (z.B. Beleuchtung, Kochen, Raumkomfort, Mobilität und Kommunikation) und für Produktionsprozesse. [1.1.1, 9.3.2] Seit etwa 1850 ist die globale Nutzung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl und Gas) so stark gestiegen, dass sie die Energieversorgung dominieren, was zu einer raschen Zunahme der Emissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) geführt hat [Abbildung 1.6].

**Emissionen von Treibhausgasen (THG) infolge der Bereitstellung von Energiedienstleistungen haben zum historischen Anstieg atmosphärischer THG-Konzentrationen erheblich beigetragen.** Der Vierte Sachstandsbericht des IPCC (AR4) stellte fest:

„Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich<sup>2</sup> durch den beobachteten Anstieg der Konzentrationen anthropogener Treibhausgase verursacht worden.“

**Neue Daten bestätigen, dass der überwiegende Anteil globaler anthropogener THG-Emissionen vom Verbrauch fossiler Brennstoffe stammt.**<sup>3</sup> Die Emissionen nehmen weiter zu und die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen waren bis Ende des Jahres 2010 auf über 390 ppm oder 39% über das vorindustrielle Niveau angestiegen. [1.1.1, 1.1.3]

**Es gibt vielfältige Optionen, die THG-Emissionen aus dem Energiesystem zu verringern und dennoch den globalen Bedarf an Energiedienstleistungen zu decken.** [1.1.3, 10.1] Einige dieser möglichen Optionen wie etwa Energieeinsparungen und Energieeffizienz, Umstellung auf emissionsärmere fossile Brennstoffe, EE, Kernenergie sowie CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS) wurden im AR4 bewertet. Eine umfassende Begutachtung jedes Portfolios von Minderungsoptionen würde die Bewertung des jeweiligen Minderungspotenzials und Beitrags zu nachhaltiger Entwicklung sowie alle zugehörigen Risiken und Kosten beinhalten. [1.1.6] Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die Rolle, welche die Einführung von EE-Technologien im Rahmen eines solchen Portfolios von Minderungsoptionen spielen kann.

**Über ihr großes Potenzial zur Minderung des Klimawandels hinaus können EE auch weiterreichende Vorteile bieten.** Richtig eingesetzt können EE zur sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung, zum Zugang zu Energie, zu einer sicheren Energieversorgung und zur Verringerung negativer Auswirkungen auf die Umwelt und Gesundheit beitragen. [9.2, 9.3]

**Unter den meisten Rahmenbedingungen werden für eine Erhöhung des EE-Anteils am Energiemix politische Maßnahmen erforderlich sein, um Veränderungen im Energiesystem zu stimulieren.** Der Einsatz von EE-Technologien ist in den letzten Jahren rasch angestiegen und die meisten ambitionierten Minderungsszenarien projizieren eine erhebliche Zunahme ihres Anteils [1.1.5, 10.2]. Um die notwendigen Steigerungen der Investitionen in Technologien und Infrastruktur anzuregen, wären zusätzliche politische Maßnahmen erforderlich. [11.4.3, 11.5, 11.6.1, 11.7.5]

<sup>2</sup> Entsprechend der offiziellen Terminologie für Unsicherheiten im AR4 bezieht sich der Ausdruck „sehr wahrscheinlich“ auf eine Eintrittswahrscheinlichkeit, die als > 90% bewertet wurde.

<sup>3</sup> Die im AR4 ausgewiesenen Beiträge einzelner anthropogener THG zu den Gesamtemissionen in CO<sub>2</sub>eq beliefen sich im Jahr 2004 auf folgende Werte: CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen (56,6%), CO<sub>2</sub> aus Entwaldung, Abbau von Biomasse usw. (17,3%), CO<sub>2</sub> aus anderen Quellen (2,8%), Methan (14,3%), Lachgas (7,9%) und fluorierte Gase (1,1%) [Abbildung 1.1b, AR4, AG III, Kapitel 1. Weitere Informationen zu den Emissionen der jeweiligen Sektoren, einschließlich Forstwirtschaft, siehe auch Abbildung 1.3b und die zugehörigen Fußnoten].

### 3. Technologien und Märkte für erneuerbare Energien

**EE umfassen eine heterogene Klasse von Technologien** (Box SPM.1). Die verschiedenen EE können Elektrizität, Wärme und mechanische Energie sowie Brennstoffe liefern, die den Bedarf an vielfältigen Energiedienstleistungen decken können [1.2]. Einige EE-Technologien können direkt am Ort der Nutzung (dezentral) in ländlichem und städtischem Umfeld eingesetzt werden, während andere in erster Linie in großen Energienetzen (zentralisiert) genutzt werden [1.2, 8.2, 8.3, 9.3.2]. Auch wenn immer mehr EE-Technologien technisch ausgereift sind und in erheblichem Umfang eingesetzt werden, befinden sich andere noch in einer früheren Phase der technischen Reife und des kommerziellen Einsatzes bzw. besetzen spezialisierte Nischenmärkte [1.2]. Die Energieabgabe von EE-Technologien kann folgendermaßen sein: (i) variabel und – in gewissem Ausmaß – über unterschiedliche Zeitspannen (von Minuten bis Jahren) unvorhersehbar, (ii) variabel aber vorhersehbar, (iii) stetig oder (iv) regelbar. [8.2, 8.3]

#### Box SPM.1 | In diesem Bericht berücksichtigte Quellen und Technologien erneuerbarer Energie.\*

**Bioenergie** kann aus vielfältigen Biomasse-Rohstoffen gewonnen werden, einschließlich Reststoffen aus der Forst- und Landwirtschaft und Viehhaltung, Kurzumtriebsplantagen, Energiepflanzen, organischen Bestandteilen fester Siedlungsabfälle sowie sonstigen organischen Abfällen. Durch eine Vielzahl von Prozessen können diese Rohstoffe entweder direkt zur Strom- oder Wärmeerzeugung eingesetzt oder zur Herstellung gasförmiger, flüssiger oder fester Brennstoffe verwendet werden. Die Bandbreite der Bioenergie-Technologien ist groß und der technische Reifegrad variiert erheblich. Einige Beispiele am Markt erhältlicher Technologien sind u. a. kleine und große Dampfkessel, Heizungsanlagen auf Pellet-Basis und die Äthanolgewinnung aus Zucker und Stärke. Fortschrittliche Gas- und Dampf-Kombikraftwerke mit integrierter Biomasse-Vergasung oder Lignozellulose-basierte Kraftstoffe sind Beispiele für Technologien in der vorkommerziellen Phase, während die Erzeugung von flüssigen Biokraftstoffen aus Algen sowie einige andere biologische Umwandlungsansätze noch im Stadium der Forschung und Entwicklung (FuE) sind. Bioenergie-Technologien werden zentralisiert und dezentral eingesetzt, wobei die traditionelle Nutzung von Biomasse in Entwicklungsländern derzeit die am weitesten verbreitete Anwendung ist.<sup>4</sup> Bioenergie bietet üblicherweise eine stetige oder regelbare Energieabgabe. Bioenergie-Projekte hängen zumeist von der lokalen und regionalen Verfügbarkeit vom Rohstoff-Nachschub ab, neue Entwicklungen zeigen jedoch, dass feste Biomasse und flüssige Biokraftstoffe zunehmend auch international gehandelt werden. [1.2, 2.1, 2.3, 2.6, 8.2, 8.3]

**Direkte Solarenergie-Technologien** machen sich die Strahlungsenergie der Sonne zu Nutze, um mittels Photovoltaik (PV) und konzentrierender solarthermischer Kraftwerke (Concentrating Solar Power, CSP) Strom zu erzeugen, um Wärmeenergie zu produzieren (die mithilfe aktiver oder passiver Techniken für Heiz- oder Kühlzwecke verwendet werden kann), um den unmittelbaren Beleuchtungsbedarf zu decken und um – potenziell – Kraftstoffe zu liefern, die für Transport- und sonstige Zwecke genutzt werden könnten. Die technische Reife von Solarenergie-Anwendungen reicht vom FuE-Stadium (z.B. Kraftstoffe aus Solarenergie) über relativ ausgereift (z.B. CSP) bis zu ausgereift (z.B. passive und aktive Solarheizung sowie Siliziumwafer-basierte PV). Viele, jedoch nicht alle der Technologien sind modular, was ihren Einsatz sowohl in zentralisierten als auch in dezentralen Energiesystemen ermöglicht. Solarenergie ist variabel und in gewissem Umfang nicht vorhersehbar; allerdings korreliert das zeitliche Profil der Solarenergieabgabe unter bestimmten Umständen relativ gut mit der Energienachfrage. Wärmespeicherung bietet die Möglichkeit, die Energieabgaberegulierung für einige Technologien wie CSP und direkte Solarbeheizung zu verbessern. [1.2, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 8.2, 8.3]

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Die Reihenfolge dieser Liste folgt dem deutschen Alphabet und entspricht daher nicht dem englischen Original.

<sup>4</sup> Traditionelle Nutzung von Biomasse wird von der Internationalen Energieagentur (IEA) definiert als häuslicher Verbrauch von Biomasse in Entwicklungsländern und bezeichnet die häufig nicht nachhaltige Verwendung von Holz, Holzkohle, landwirtschaftlichen Abfallprodukten und tierischem Dung zum Kochen und Heizen. Alle übrigen Biomasse-Nutzungsarten werden als modern definiert [Anhang I].

**Erdwärme (Geothermie)** nutzt die zugängliche Wärmeenergie aus dem Erdinneren. Dabei wird geothermischen Lagerstätten durch Bohrungen und sonstige Techniken Wärme entnommen. Lagerstätten, die von Natur aus ausreichend heiß und durchlässig sind, werden als hydrothermale Speicher bezeichnet, während Lagerstätten, die ausreichend heiß sind, jedoch durch hydraulische Stimulation verbessert werden, Enhanced Geothermal Systems (EGS\*) genannt werden. Sobald sie an die Oberfläche befördert wurden, können Flüssigkeiten verschiedener Temperaturen für die Stromerzeugung oder direkt für Einsatzbereiche genutzt werden, die Wärmeenergie benötigen, darunter Fernwärmesysteme oder die Nutzung von Niedrigtemperaturwärme aus Brunnen geringer Tiefe für geothermische Wärmepumpen in Heiz- oder Kühlungsanwendungen. Hydrothermale Kraftwerke und die direkte Nutzung von Erdwärme sind ausgereifte Technologien, wohingegen sich EGS-Projekte erst in der Demonstrations- und Pilotphase sowie teilweise noch in FuE befinden. In der Stromerzeugung bieten Geothermalkraftwerke üblicherweise eine stetige Energieabgabe. [1.2, 4.1, 4.3, 8.2, 8.3]

**Meeresenergie** wird aus der potenziellen kinetischen, thermischen und chemischen Energie von Meerwasser gewonnen, die sich in Strom, Wärme umwandeln oder zur Trinkwassergewinnung einsetzen lässt. Dabei ist ein breites Spektrum an Technologien möglich, wie etwa Staudämme zur Nutzung des Tidenhubs, Unterwasserturbinen für Gezeiten- und Meeresströmungen, Wärmetauscher zur Umwandlung der Wärmeenergie des Meeres in Strom sowie vielfältige Anlagen zur Nutzung der Energie von Wellen und Salzgradienten. Meeresenergie-Technologien mit Ausnahme der Gezeitenkraftwerke befinden sich in der Demonstrations- und Pilot-Phase und viele erfordern weitere FuE. Einige der Technologien weisen variable Energieabgabe-Profile mit unterschiedlichem Vorhersehbarkeitsgrad auf (z.B. von Wellenschlag, Tidenhub und Strömungen), wohingegen andere möglicherweise nahezu stetig oder sogar regelbar betrieben werden können (z.B. Meereswärme- und Osmosekraftwerke\*\*). [1.2, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.6, 8.2]

**Wasserkraft** nutzt die Energie von Wasser, das von höheren in tiefere Lagen fließt, in erster Linie zur Stromerzeugung. Wasserkraftanlagen sind sehr unterschiedlich dimensioniert und umfassen Dämme mit Staubecken sowie Laufwasserkraftwerke mit und ohne Schwellbetrieb. Aufgrund dieser Vielfalt kann Wasserkraft hohen, zentralisierten städtischen Bedarf wie auch dezentralen ländlichen Bedarf decken. Wasserkrafttechnologien sind ausgereift. Wasserkraftanlagen nutzen eine Ressource, die zeitlich variiert. Allerdings ist die Energieabgabe bei Wasserkraftanlagen mit Staubecken regelbar und kann Lastspitzen abdecken und Elektrizitätssysteme stabilisieren, die zu einem großen Anteil auf variablen EE beruhen. Der Betrieb von Wasserkraft-Staubecken beinhaltet neben der Energieversorgung häufig weitere Nutzungsmöglichkeiten wie die Trinkwasserentnahme, Bewässerung oder Hoch- und Niedrigwasserkontrolle, Schifffahrt. [1.2, 5.1, 5.3, 5.5, 5.10, 8.2]

**Windenergie** macht sich die kinetische Energie von Luftbewegungen zu Nutze. Der Hauptanwendungsbereich mit Relevanz für die Minderung des Klimawandels ist die Erzeugung von Strom mit großen Windrädern, an Land (onshore) oder im Meer oder Süßwasser (offshore). Onshore-Windenergie-Technik wird bereits in großem Maßstab hergestellt und eingesetzt. Offshore-Windenergie-Technik hat ein größeres Potenzial für weitere technologische Entwicklungen. Strom aus Windkraft ist sowohl variabel als auch – in gewissem Umfang – nicht vorhersagbar. Erfahrungen und detaillierte Untersuchungen in zahlreichen Regionen zeigen jedoch, dass die Integration von Windenergie normalerweise keine unüberwindbaren technischen Hindernisse beinhaltet. [1.2, 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, 8.2]

---

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Im Deutschen bezeichnet man EGS auch als „Petrothermale Systeme“.

\*\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Im Deutschen werden Osmosekraftwerke auch „Salzgradientenkraftwerk“ genannt.

**Schätzungen zufolge haben EE im Jahr 2008 mit rund 12,9% zu den insgesamt 492 Exajoule (EJ)\* an weltweit bereitgestellter Primärenergie beigetragen** (Box SPM.2 und Abbildung SPM.2). Den größten Beitrag dazu leistete Biomasse mit 10,2%, die überwiegend (zu rund 60%) auf traditioneller Nutzung zum Kochen und Heizen in Entwicklungsländern beruht, wobei jedoch auch die Nutzung moderner Biomasse rasch zunimmt.<sup>6</sup> Auf Wasserkraft entfiel ein Anteil von 2,3% und auf sonstige EE ein Anteil von 0,4%. [1.1.5] Im Jahr 2008 trugen EE rund 19% zur globalen Stromversorgung (16% Wasserkraft, 3% sonstige EE) und Biokraftstoffe 2% zur globalen Kraftstoffversorgung für den Straßenverkehr bei. Traditionelle Biomasse (17%), moderne Biomasse (8%), Solarthermie und Geothermie (2%) deckten zusammengekommen 27% des gesamten globalen Wärmebedarfs. Der Beitrag von EE zur Primärenergieversorgung ist von Land zu Land und regional stark unterschiedlich. [1.1.5, 1.3.1, 8.1]

**Der Einsatz von EE hat in den letzten Jahren rasch zugenommen** (Abbildung SPM.3). Verschiedene politische Maßnahmen seitens der Regierungen, sinkende Kosten zahlreicher EE-Technologien, Preisänderungen fossiler Brennstoffe, der Anstieg des Energiebedarfs und weitere Faktoren waren für die anhaltende Zunahme der Nutzung von EE förderlich. [1.1.5, 9.3, 10.5, 11.2, 11.3] Trotz weltweiter Finanzprobleme ist die EE-Kapazität im Jahr 2009 weiterhin rasch gegenüber der kumulierten installierten Kapazität des Vorjahres gewachsen, wie folgende Zahlen zeigen: Windkraft (32% Zunahme, 38 Gigawatt (GW) zusätzlich), Wasserkraft (3%, 31 GW zusätzlich), netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen (53%, 7,5 GW zusätzlich), Geothermie (4%, 0,4 GW zusätzlich) und Heißwasserbereitung/Heizung mit Solarenergie (21%, 31 GW<sub>th</sub> zusätzlich). Biokraftstoffe deckten 2008 rund 2% und 2009 fast 3% der globalen Nachfrage nach Kraftstoffen für den Straßenverkehr. Die jährliche Produktion von Äthanol stieg bis Ende 2009 auf 1,6 EJ (76 Mrd. Liter) und die von Biodiesel auf 0,6 EJ (17 Mrd. Liter). [1.1.5, 2.4, 3.4, 4.4, 5.4, 7.4]

Von der in den zwei Jahren von 2008 bis 2009 weltweit neu hinzugekommenen Stromerzeugungskapazität von rund 300 GW entfielen 140 GW auf EE-Zuwachs. Zusammengekommen haben die Entwicklungsländer einen Anteil von 53% an der globalen EE-Stromerzeugungskapazität [1.1.5]. Ende 2009 umfasste der Einsatz von EE auf den Warmwasser-/Heizungsmärkten moderne Biomassenutzung (270 GW<sub>th</sub>), Solartechnik (180 GW<sub>th</sub>) und Geothermie (60 GW<sub>th</sub>). Die Nutzung dezentraler EE (ausgenommen traditionelle Biomasse) bei der Deckung des ländlichen Energiebedarfs auf Haushalts- oder Siedlungsebene hat ebenfalls zugenommen. Dies umfasst Wasserkraftwerke, verschiedene Möglichkeiten moderner Biomassetechnologien, PV, Windkraft oder Hybridanlagen mit kombinierten Technologien. [1.1.5, 2.4, 3.4, 4.4, 5.4]

### Box SPM.2 | Berechnung von Primärenergie im SRREN.

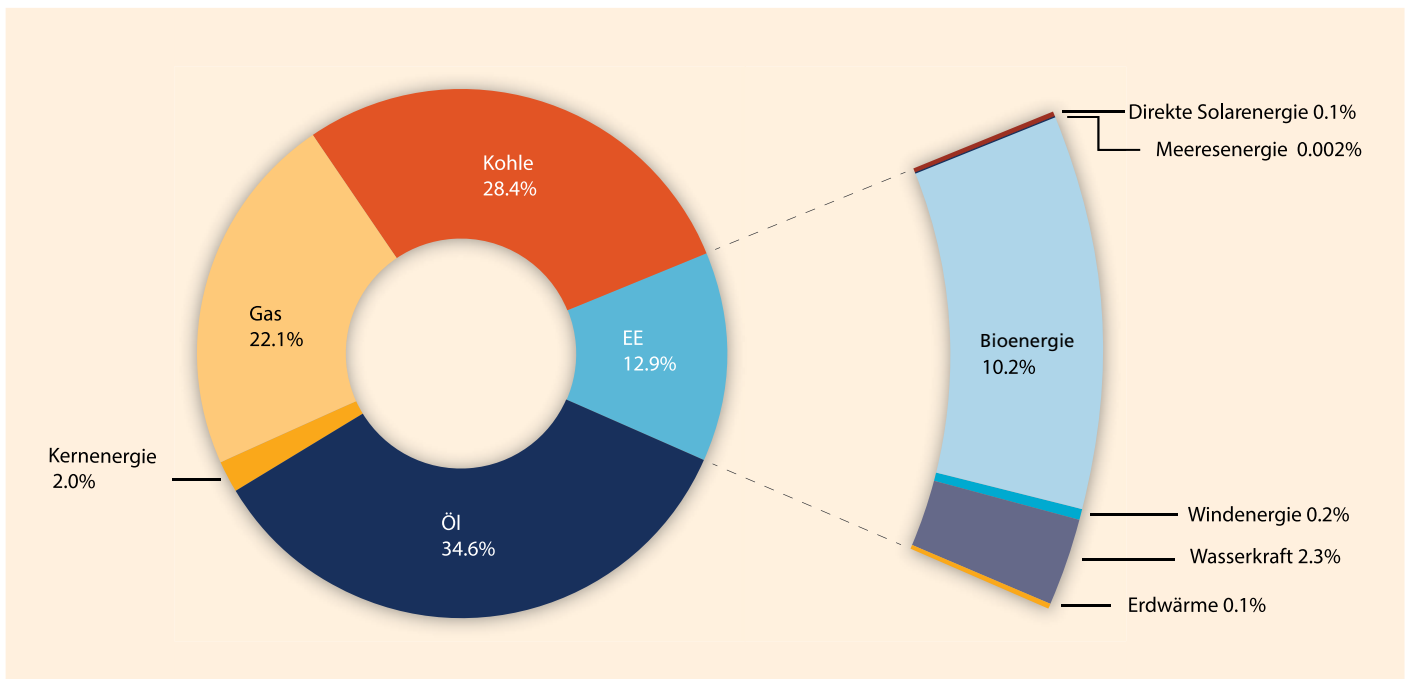
Es gibt keine einheitliche, eindeutige Methode zur Berechnung von Primärenergie aus nicht-brennbaren Energieträgern wie nicht-brennbare EE-Quellen und Kernenergie. Im SRREN wird die Primärenergieversorgung nach der „direkten Äquivalenzmethode“\* berechnet. Danach werden fossile Brennstoffe und Biomasse anhand ihres Heizwerts bilanziert. Bei nicht-brennbaren Energieträgern einschließlich Kernenergie und allen nicht-brennbaren EE wird hingegen die aus ihnen erzeugte Sekundärenergie angerechnet. Dies kann zu einer Unterbewertung des Beitrags von nicht-brennbaren EE und Kernenergie um einen Faktor von rund 1,2 bis 3 gegenüber Bioenergie und fossilen Brennstoffen führen. Die Wahl der Bilanzierungsmethode wirkt sich auch auf die relativen Anteile unterschiedlicher, individueller Energiequellen aus. Die im SRREN anhand von Daten und Abbildungen präsentierten Vergleiche zwischen fossilen Brennstoffen und Bioenergie einerseits und nicht-brennbaren EE und Kernenergie andererseits spiegeln diese Bilanzierungsmethode wider. [1.1.9, Anhang II.4]\*\*

<sup>5\*</sup> 1 Exajoule = 10<sup>18</sup> Joule = 23,88 Millionen Tonnen Öläquivalente (Mtoe). Anmerkung der deutschen Redaktion: Im Deutschen wird „toe“ auch als „Tonnen Rohöleinheit (tRÖL)“ bezeichnet.

<sup>6</sup> Zu diesem 60%-Anteil traditioneller Biomasse kommt eine auf 20 bis 40% geschätzte und in offiziellen Primärenergie-Statistiken nicht ausgewiesene Nutzung von Biomasse hinzu, beispielsweise tierischer Dung, nicht erfasste Holzkohleherstellung, illegaler Holzeinschlag, Sammeln von Feuerholz und Nutzung landwirtschaftlicher Abfallprodukte. [2.1, 2.5]

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: „Direct Equivalent Method“ wird auch mit „Wirkungsgradmethode“ übersetzt.

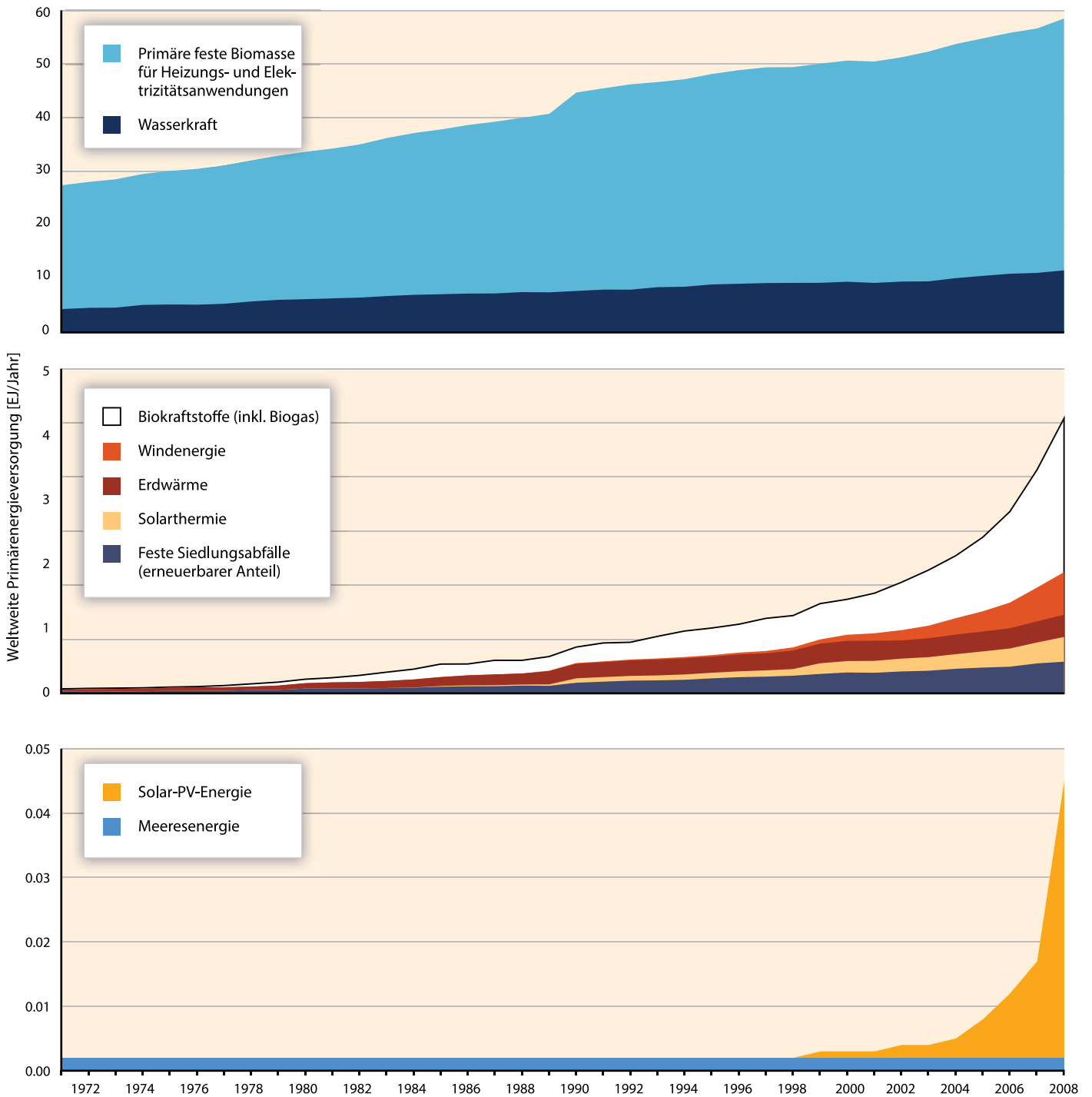
\*\* Anmerkung: Die der Abbildung SPM.2 zugrunde liegenden Daten wurden nach der „direkten Äquivalenzmethode“ zur Primärenergiebilanzierung berechnet.



**Abbildung SPM.2** | Anteile von Energiequellen an der gesamten globalen Primärenergieversorgung im Jahr 2008 (492 EJ). Auf moderne Biomasse entfallen 38% des Biomassen-Gesamtanteils. [Abbildung 1.10, 1.1.5]

**Das globale technische Potential<sup>7</sup> von EE wird das anhaltende Wachstum der Nutzung von EE nicht begrenzen.** In der Literatur wird eine große Bandbreite von Schätzwerten angegeben, Studien zeigen jedoch übereinstimmend, dass das globale technische Potenzial von EE erheblich größer ist als der globale Energiebedarf (Abbildung SPM.4) [1.2.2, 10.3, Anhang II]. Solarenergie hat das größte technische Potenzial unter den EE, jedoch haben alle sechs EE ein beträchtliches technisches Potenzial. Selbst in Regionen mit einem relativ geringen technischen Potenzial für einzelne EE-Quellen kann der Einsatz im Vergleich zum derzeitigen Niveau meist erheblich verstärkt werden. [1.2.2, 2.2, 2.8, 3.2, 4.2, 5.2, 6.2, 6.4, 7.2, 8.2, 8.3, 10.3] Längerfristig und ab einem höheren Einsatzniveau können die technischen Potenziale den Beitrag einzelner EE-Technologien allerdings begrenzen. Auch Faktoren wie Nachhaltigkeit [9.3], öffentliche Akzeptanz [9.5], systemintegrations- und infrastrukturbedingte Beschränkungen [8.2] oder wirtschaftliche Faktoren [10.3] können den Ausbau von EE-Technologien begrenzen.

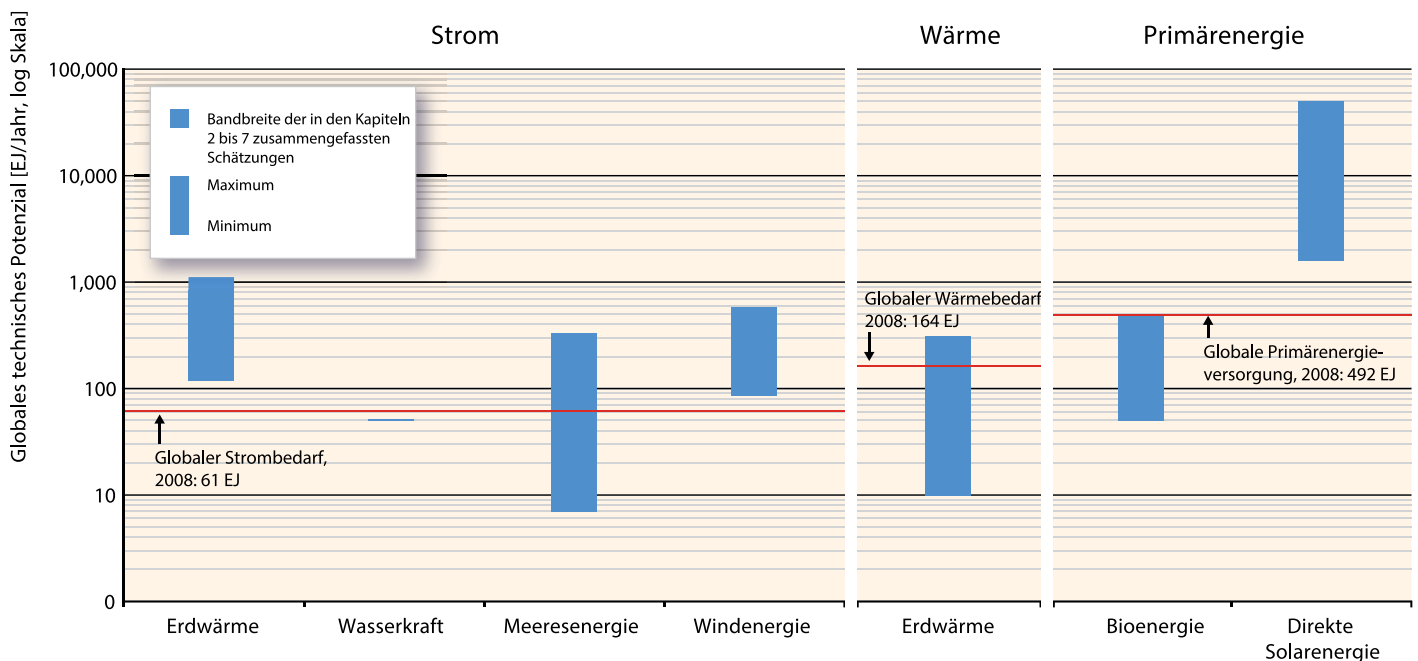
<sup>7</sup> Das technische Potenzial wird in verschiedenen Studien unterschiedlich definiert. Im SRREN bezeichnet das „technische Potenzial“ die Energieabgabe bei vollständiger Anwendung einsatzbereiter Technologien oder Praktiken. Kosten, Hemmnisse oder politische Maßnahmen werden dabei nicht explizit berücksichtigt. Bei den in der Literatur ausgewiesenen und im SRREN untersuchten technischen Potenzialen können jedoch praktische Einschränkungen berücksichtigt sein, die bei ausdrücklicher Nennung im Bericht angegeben werden. [Anhang I]



**Abbildung SPM.3** | Historische Entwicklung der globalen Primärenergieversorgung aus EE von 1971 bis 2008. [Abbildung 1.12, 1.1.5]

Anmerkungen: Die Energieabgaben pro Jahr für die verschiedenen Technologien sind zur Veranschaulichung auf unterschiedlichen vertikalen Achsen angegeben. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten wurden mit der „direkten Äquivalenzmethode“ zur Primärenergiebilanzierung berechnet [Box SPM.2, 1.1.9, Anhang II.4], mit Ausnahme von Biokraftstoffen, deren Energiegehalt nach ihrer Sekundärenergie ausgewiesen ist (die Werte für die zur Herstellung des Biokraftstoffs genutzten primären Biomasse wären wegen Umwandlungsverlusten höher. [2.3, 2.4])

**Der Klimawandel wird Folgen für den Umfang und die geographische Verteilung des technischen Potenzials für EE haben, die Erforschung der Größenordnung dieser möglichen Auswirkungen steht jedoch erst am Anfang.** Da EE-Quellen in vielen Fällen klimaabhängig sind, wird sich der globale Klimawandel auf die vorhandenen EE-Ressourcen auswirken, wobei die genaue Art und Größenordnung dieser Folgen allerdings ungewiss ist. Das künftige technische Potenzial von Bioenergie könnte durch den Klimawandel beeinflusst werden, wenn dieser sich auf die Produktion von Biomasse auswirkt, beispielsweise durch Veränderungen von Bodenqualität, Niederschlägen, Pflanzenproduktivität und anderen Faktoren. Insgesamt dürften die Auswirkungen einer Änderung der globalen Mitteltemperatur um weniger als 2°C auf das technische Potenzial von Bioenergie auf globaler Basis vergleichsweise gering sein. Allerdings könnten erhebliche regionale Unterschiede zu erwarten sein, wobei auch die Unsicherheiten im Vergleich zu anderen EE-Optionen wegen der großen Zahl beteiligter Rückkopplungsmechanismen größer und schwieriger einzuschätzen sind. [2.2, 2.6] Bei Solarenergie wird trotz der mutmaßlichen Beeinflussung von Verteilung und Variabilität der Wolkenbedeckung durch Klimawandel nur mit geringen Auswirkungen auf das gesamte technische Potenzial gerechnet [3.2]. Bei Wasserkraft dürften die Gesamtauswirkungen auf das globale technische Potenzial geringfügig positiv sein. Die vorliegenden Ergebnisse deuten allerdings auch auf die Möglichkeit erheblicher Schwankungen zwischen verschiedenen Regionen und sogar innerhalb von Ländern hin. [5.2] Die bisherige Forschung lässt darauf schließen, dass der Klimawandel keine großen Auswirkungen auf das globale technische Potenzial für die Windenergieentwicklung haben dürfte, Veränderungen der regionalen Verteilung der Ressource Windenergie könnten jedoch auftreten [7.2]. Voraussichtlich wird der Klimawandel keine bedeutenden Auswirkungen auf die Größenordnung oder geographische Verteilung der Ressourcen von Erdwärme- oder Meeresenergie haben. [4.2, 6.2]



Bandbreite von Schätzungen weltweiter technischer Potenziale

Max (in EJ/Jahr)	1109	52	331	580	312	500	49837
Min (in EJ/Jahr)	118	50	7	85	10	50	1575

**Abbildung SPM.4** | Bandbreiten globaler technischer Potenziale von EE-Quellen aus den in Kapitel 2 bis 7 vorgestellten Studien. Bio- und Solarenergie werden wegen ihrer vielfachen Einsatzmöglichkeiten als Primärenergie ausgewiesen; zu beachten ist die logarithmische Darstellung aufgrund der großen Bandbreite der untersuchten Daten. [Abbildung 1.17, 1.2.3]



Anmerkungen zur Abbildung SPM.4 (Seite 27): Die hier ausgewiesenen technischen Potenziale stellen die gesamten weltweiten Potenziale für die jährliche Versorgung durch EE dar und lassen keine Rückschlüsse auf bereits genutzte Potenziale zu. Zu beachten ist, dass Strom aus EE auch für Heizanwendungen genutzt werden kann, während Bioenergie- und Solarressourcen nur auf Primärenergiebasis ausgewiesen werden, obwohl sie unterschiedliche Energiedienstleistungen liefern könnten. Die Werte beruhen auf verschiedenen Methoden und gelten für unterschiedliche Jahre in der Zukunft; daher sind die sich ergebenden Bandbreiten nicht technologieübergreifend direkt vergleichbar. Für die der Abbildung SPM.4 zugrunde liegenden Daten und die betreffenden zusätzlichen Anmerkungen siehe Kapitel 1 Anhang, Tabelle A.1 .1 (wie auch die zugrunde liegenden Kapitel).

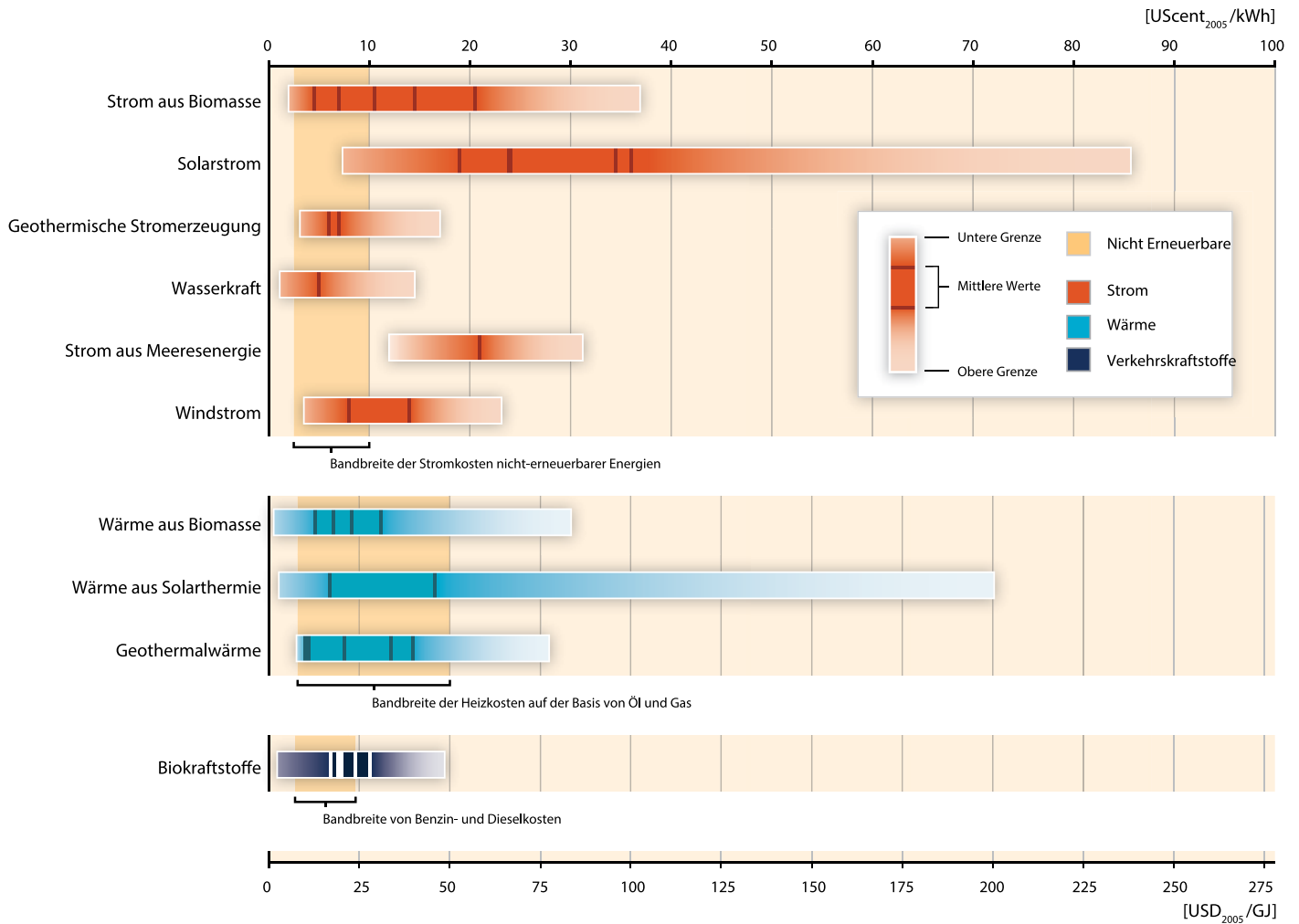
**Die spezifischen Energiegestehungskosten\*<sup>8</sup>, sind für viele EE-Technologien derzeit höher als bestehende Energiepreise, obwohl EE unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen schon heute ökonomisch wettbewerbsfähig sind.** Die Spannbreiten aktueller spezifischer Energiegestehungskosten bestimmter, am Markt verfügbarer EE-Technologien sind groß und hängen von einer Reihe von Faktoren ab, insbesondere, jedoch nicht ausschließlich, von technischen Eigenschaften, regionalen Kosten- und Leistungsschwankungen sowie unterschiedlichen Diskontsätzen (Abbildung SPM.5). [1.3.2, 2.3, 2.7, 3.8, 4.8, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5, Anhang III] Einige EE-Technologien sind bei den derzeitigen Marktpreisen von Energie weitgehend wettbewerbsfähig. Viele der übrigen EE-Technologien können unter bestimmten Umständen wettbewerbsfähige Energiedienstleistungen liefern, beispielsweise in Regionen mit günstigen Ressourcenvoraussetzungen oder fehlender Infrastruktur für eine anderweitige kostengünstige Energieversorgung. In den meisten Regionen der Welt sind nach wie vor politische Maßnahmen erforderlich, um einen raschen Ausbau vieler EE sicherzustellen. [2.3, 2.7, 3.8, 4.7, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5]

Eine monetäre Quantifizierung der externen Kosten der Energieversorgung würde die relative Wettbewerbsfähigkeit von EE verbessern. Dasselbe gilt, wenn die Marktpreise aus anderen Gründen steigen (Abbildung SPM. 5). [10.6] Die spezifischen Energiegestehungskosten für eine Technologie bestimmen nicht allein deren Wert oder ökonomische Wettbewerbsfähigkeit. Die Attraktivität einer bestimmten Energieversorgungsoption hängt auch von weiter gefassten wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Aspekten sowie vom Beitrag ab, den die Technologie zu bestimmten Energiedienstleistungen leistet (z.B. Lastspitzenabdeckung bei der Stromversorgung) oder den es dem Energiesystem in Form von Nebenkosten auferlegt (z.B. Integrationskosten). [8.2, 9.3, 10.6]

**Die Kosten der meisten EE-Technologien sind gesunken und weitere zu erwartende technologische Entwicklungen würden zu weiteren Kostensenkungen führen.** In den letzten Jahrzehnten wurden bei EE-Technologien nachweislich erhebliche Fortschritte verzeichnet und damit verbundene langfristige Kostensenkungen erzielt, obwohl zeitweise die Preise stiegen (beispielsweise wegen zunehmender Nachfrage nach EE, die das verfügbare Angebot überstieg) (Abbildung SPM.6). Der Beitrag unterschiedlicher Einflussfaktoren (z.B. FuE, Größenvorteile, Einführungs-orientiertes Lernen sowie verstärkter Marktwettbewerb zwischen EE-Anbietern) ist nicht immer im Detail verstanden. [2.7, 3.8, 7.8, 10.5] Weitere Kostensenkungen, die zu einem größeren möglichen Einsatz verbunden mit einer Minderung des Klimawandels führen, werden erwartet. Beispiele für wichtige Bereiche potenzieller technischer Fortschritte sind u. a. neue und verbesserte Systeme zur Herstellung und Bereitstellung von Rohstoffen, durch neue Prozesse hergestellte Biokraftstoffe (auch als Biokraftstoffe der nächsten Generation oder moderne Biokraftstoffe bezeichnet, z.B. auf Lignozellulose-Basis) und fortschrittliche Bioraffinerie-Verfahren [2.6]; fortschrittliche Technologien und Herstellungsprozesse für PV und CSP [3.7]; Enhanced Geothermal Systems (EGS) [4.6]; vielfältige neuartige Meeresenergie-Technologien [6.6] sowie Fundament- und Turbinen-Konzepte für Offshore-Windenergie [7.7]. Bei Wasserkraft dürften weitere Kostensenkungen geringer ausfallen als bei manchen der anderen EE-Technologien. Durch FuE bestehen jedoch Chancen, die technische Machbarkeit von Wasserkraftanlagen auf vielfältigere Standorte auszudehnen und die technische Leistung von Neu- und Bestandsanlagen zu steigern. [5.3, 5.7, 5.8]

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Der englische Ausdruck „Levelized Cost of Energy“ wird hier mit „spezifische Energiegestehungskosten“ übersetzt.

<sup>8</sup> Die spezifischen Energiegestehungskosten entsprechen den Kosten eines Energieproduktionssystems während seiner gesamten Lebensdauer; sie werden berechnet als der Stückpreis, zu dem Energie im Verlauf der Lebensdauer aus einer bestimmten Quelle erzeugt werden muss, um sich zu amortisieren. Sie umfassen zumeist alle privaten Kosten, die in den vorgelagerten Bereichen der Wertschöpfungskette entstehen, jedoch nicht die nachgelagerten Kosten der Bereitstellung für den Endkunden, die Integrationskosten oder externe Umwelt- oder sonstige Kosten. Subventionen und Steuergutschriften sind ebenfalls nicht enthalten.



Anmerkungen: Mittlere Werte werden für die folgenden Unterkategorien ausgewiesen, sortiert in der Reihenfolge, in der sie bei den jeweiligen Bandbreiten erscheinen (v. l. n. r.)

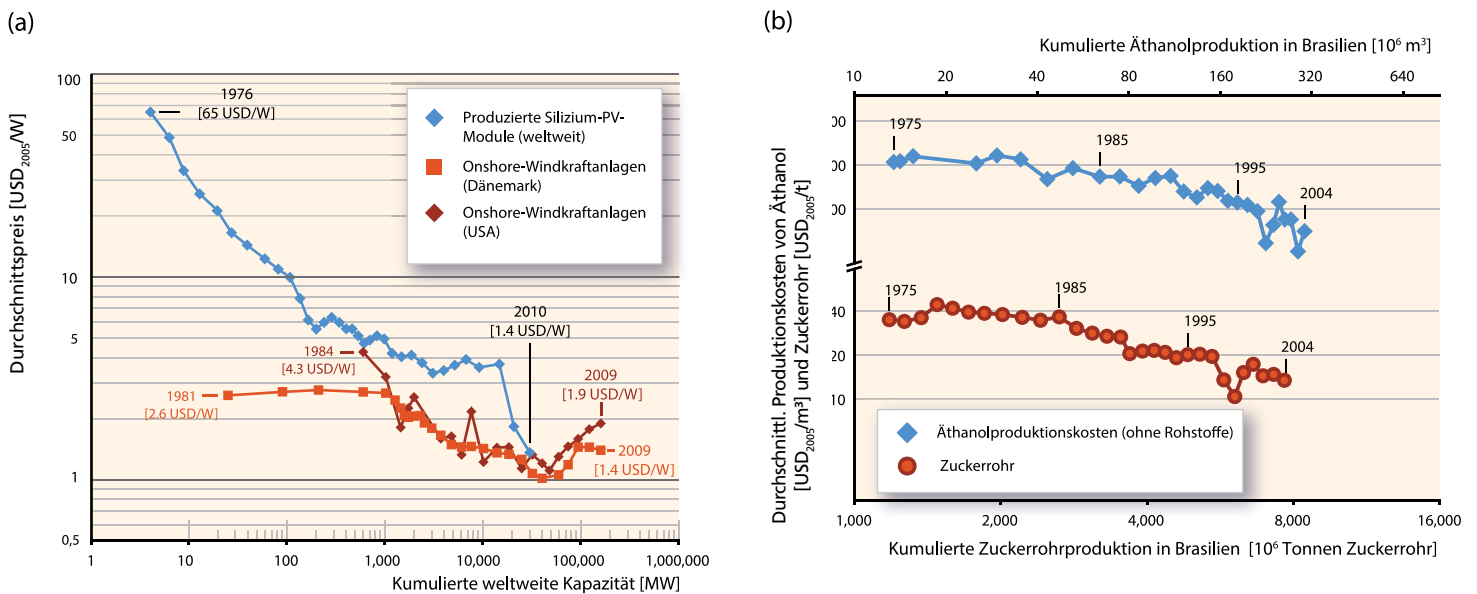
Elektrizität	Wärme	Kraftstoffe
<b>Biomasse:</b> 1. Mitverbrennung 2. Kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, KWK (Vergasungsverbrennungsmaschine) 3. Direct Dedicated Stoker & KWK 4. Klein-KWK (Dampfturbine) 5. Klein -KWK (Organic Rankine Cycle)  <b>Solarstrom:</b> 1. Solarthermie 2. PV für Versorgungsunternehmen (1-achsig und mit festem Neigungswinkel) 3. PV-Aufdachanlagen für Gewerbebauten 4. PV-Aufdachanlagen für Wohngebäude  <b>Geothermische Stromerzeugung:</b> 1. Kondensationskraftwerk 2. Binäres Kraftwerk (oder Binär-Zyklus Kraftwerk)  <b>Wasserkraft:</b> 1. Alle Typen  <b>Elektrizität aus Meeresenergie:</b> 1. Gezeitenwehre  <b>Windstrom:</b> 1. Onshore 2. Offshore	<b>Wärme aus Biomasse:</b> 1. KWK auf der Basis von festen Siedlungsabfällen 2. KWK auf der Basis von anaerober Gärung 3. Dampfturbinen-KWK 4. Pelletfeuerungsanlagen für Haushalte  <b>Wärme aus Solarthermie:</b> 1. Haushalts-Heißwasseranlagen in China 2. Warmwasserbereitung und Raumheizung  <b>Geothermische Beheizung:</b> 1. Gewächshäuser 2. Aquakulturteiche ohne Abdeckung 3. Fernwärme 4. Erdgebundene Wärmepumpen 5. Geothermische Gebäudebeheizung	<b>Biokraftstoffe:</b> 1. Mais-Äthanol 2. Soya-Biodiesel 3. Weizen-Äthanol 4. Zuckerrohr-Äthanol 5. Palmöl-Biodiesel

Der untere Bereich der spezifischen Energiegestehungskosten für jede EE-Technologie beruht auf einer Kombination der günstigsten Eingabewerte, wohingegen dem oberen Bereich eine Kombination der am wenigsten günstigen Eingabewerte zugrundeliegt. Die Referenzbandbreiten im Hintergrund der Abbildung für Elektrizitätsoptionen aus nicht erneuerbaren Energien stellen indikative Werte der spezifischen Energiegestehungskosten einer zentralen Stromerzeugung aus nicht erneuerbaren Energien dar. Die Referenzbandbreiten für Wärmeerzeugung stellen indikative Werte von Kosten der letzten Zeit für Wärmeversorgungsoptionen auf der Basis von Öl und Gas dar. Die Referenzbandbreiten für Kraftstoffe beruhen auf den in letzter Zeit erzielten Preisen des Rohöl-Spotmarktes in Höhe von 40 bis 130 US-Dollar je Barrel und entsprechenden Diesel- und Benzinpreisen ohne Steuern.

**Abbildung SPM.5** | Bandbreite von aktuellen spezifischen Energiegestehungskosten bei ausgewählten, am Markt verfügbaren EE-Technologien im Vergleich zu aktuellen Kosten nicht-erneuerbarer Energien. Die technischen Unterkategorien und die Diskontsätze wurden für diese Abbildung zusammengefasst. Zu ähnlichen Abbildungen mit weniger oder ohne derartige Aggregation siehe [1.3.2, 10.5, Anhang III].

**Möglicherweise muss einer Vielzahl technologiespezifischer Herausforderungen (zusätzlich zu den Kosten) begegnet werden, um den Beitrag der EE zur Reduzierung von THG-Emissionen erheblich zu steigern.**

Für die verstärkte und nachhaltige Nutzung von Bioenergie können durch eine sachgerechte Konzeption, Umsetzung und Überwachung von Nachhaltigkeitskriterien negative Folgen minimiert und soziale, ökonomische und ökologische Vorteile maximiert werden [SPM.5, 2.2, 2.5, 2.8]. Bei Solarenergie kann der Ausbau durch ordnungspolitische und institutionelle Hemmnisse wie auch durch Probleme der Integration und der Übertragung behindert werden [3.9]. Bei geothermischer Energie wäre es wichtig nachzuweisen, dass Enhanced Geothermal Systems wirtschaftlich, nachhaltig und weit verbreitet zum Einsatz kommen können [4.5, 4.6, 4.7, 4.8]. Neue Wasserkraftanlagen können standortspezifische ökologische und soziale Auswirkungen haben. Der verstärkte Ausbau bedarf wahrscheinlich eines verbesserten Instrumentariums zur Beurteilung der Nachhaltigkeit sowie regionale und multilaterale Kooperationen für Energie- und Wasserbelange [5.6, 5.9, 5.10]. Der Ausbau von Meeresenergie könnte von Testzentren für Demonstrationsprojekte sowie von speziellen politischen Maßnahmen und von Regelungen profitieren, die den frühzeitigen Ausbau fördern [6.4]. Bei Windenergie können technologische und institutionelle Lösungen für Übertragungsgänge und betriebliche Integration besonders wichtig sein, wie auch Fragen der öffentlichen Akzeptanz, vor allem im Hinblick auf Veränderungen des Landschaftsbildes. [7.5, 7.6, 7.9]



**Abbildung SPM.6** | Ausgewählte Erfahrungskurven auf logarithmischer Skala für (a) den Preis von Silizium-PV-Modulen und Onshore-Windkraftanlagen je Kapazitätseinheit und (b) die Kosten der Äthanolherstellung auf Zuckerrohrbasis [Daten aus Abbildung 3.17, 3.8.3, Abbildung 7.20, 7.8.2, Abbildung 2.21, 2.7.2].

Anmerkungen: Je nach Rahmenbedingungen können Kostensenkungen in unterschiedlichem geographischem Maßstab auftreten. Die hier auf Landesebene aufgeführten Beispiele stammen aus der veröffentlichten Literatur. Globale Datensätze der Preise oder Kosten von Windkraftanlagen sind derzeit nicht verfügbar. Sinkende Kosten oder Preise einer Technologie pro Kapazitätseinheit berücksichtigen Senkungen der spezifischen Energiegestehungskosten dieser Technologie durch Leistungsverbesserungen nur unzureichend. [7.8.4, 10.5]

## 4. Integration in heutige und künftige Energiesysteme

Verschiedene EE-Ressourcen werden bereits erfolgreich in Energieversorgungssysteme [8.2] und in Endverbrauchssektoren [8.3] integriert (Abbildung SPM.7).

Die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen EE-Quellen können die Größenordnung der Herausforderung beeinflussen, die mit ihrer Integration verbunden ist. Manche EE-Ressourcen sind räumlich weit verteilt. Andere – wie große Wasserkraftanlagen – können stärker zentralisiert sein. Ihre Integrationsmöglichkeiten sind jedoch durch den geographischen Standort eingeschränkt. Die Verfügbarkeit einiger EE-Ressourcen ist variabel und nur begrenzt vorhersagbar. Manche weisen geringere physikalische Energiedichten und andere technische Eigenschaften auf als fossile Brennstoffe. Diese Eigenschaften können die Integration erschweren und zusätzliche Systemkosten verursachen, insbesondere wenn höhere Anteile von EE erreicht werden. [8.2]

Die beschleunigte Integration von EE in die meisten vorhandenen Energieversorgungssysteme und Endverbrauchssektoren – die zur Erhöhung der EE-Anteile führt – ist technologisch machbar aber mit einer Reihe weiterer Herausforderungen verbunden. Im Rahmen eines Gesamtportfolios von Technologien mit geringen THG-Emissionen werden höhere Anteile von EE erwartet [10.3, Tabellen 10.4-10.6]. Die mit der Integration von EE verbundenen Herausforderungen – sei es bei der Elektrizitätserzeugung, der Beheizung, der Kühlung, der Bereitstellung gasförmiger oder flüssiger Brennstoffe einschließlich der direkten Integration in Endverbrauchssektoren – sind kontextabhängig sowie standortspezifisch und schließen auch die Anpassung bestehender Energieversorgungssysteme ein. [8.2, 8.3]

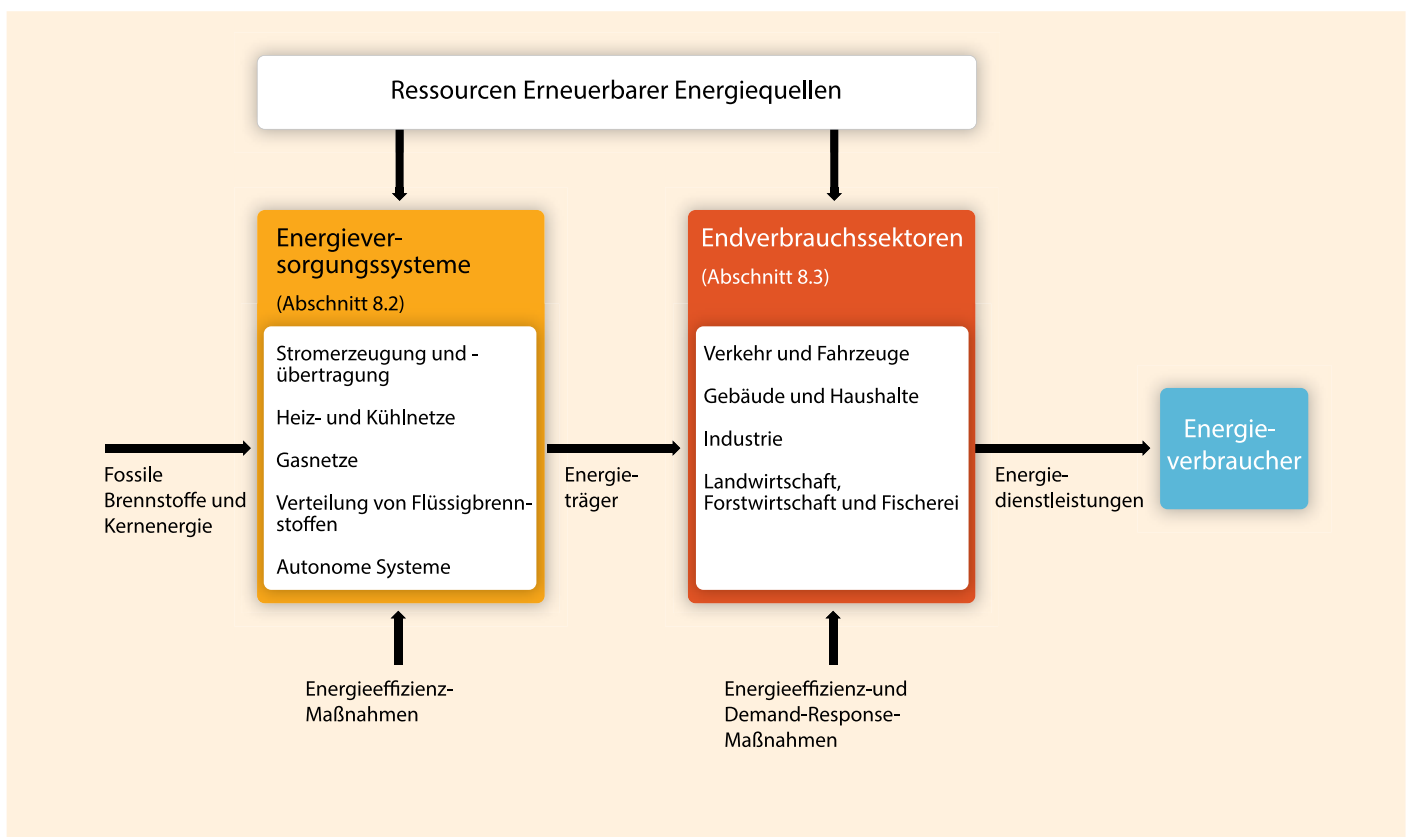


Abbildung SPM.7 | Wege der EE-Integration um Energiedienstleistungen bereitzustellen, entweder in Energieversorgungssysteme oder vor Ort zur Nutzung durch die Endverbrauchssektoren. [Abbildung 8.1, 8.1]

**Die Kosten und die Herausforderungen, die mit der Integration zunehmender EE-Anteile in ein vorhandenes Energieversorgungssystem verbunden sind, hängen vom aktuellen Anteil der EE, der Verfügbarkeit und den Eigenschaften der EE-Ressourcen, den Systemeigenschaften und der künftigen Entwicklung und Veränderung des Systems ab.**

- EE können in alle Arten von *Elektrizitätsversorgungssystemen* integriert werden, die von großen, interkontinentalen Netzen [8.2.1] bis hinab zu kleinen, isolierten Systemen und Einzelgebäuden [8.2.5] reichen. Die relevanten Systemeigenschaften umfassen den Stromerzeugungsmix und dessen Flexibilität, die Netzinfrastruktur, Energiemarktkonzepte und institutionelle Regelungen, den Bedarfsort, die Bedarfsprofile sowie die Steuerungs- und Kommunikationsfähigkeit. Wind, PV-Solarenergie und CSP-Technik ohne Speicherung können schwieriger zu integrieren sein als regelfähige<sup>9</sup> Wasserkraft, Bioenergie, CSP-Technik mit Speicherung und geothermische Energie.

Mit zunehmender Einspeisung variabler EE kann die Systemzuverlässigkeit schwieriger und kostspieliger aufrecht zu erhalten sein. Ein Portfolio sich ergänzender EE-Technologien ist eine der Lösungen, die Risiken und Kosten der EE-Integration zu reduzieren. Andere Lösungsansätze sind u. a. der komplementäre Einsatz flexibler Stromerzeugungsanlagen sowie die Erhöhung der Flexibilität bestehender Systeme, Verbesserungen der kurzfristigen Vorhersage, des Systembetriebs und der Planungsinstrumente, ein an die Verfügbarkeit anpassungsfähiger Strombedarf, Energiespeichertechniken (einschließlich Speicher-nutzender Wasserkraftanlagen) und angepasste institutionelle Regelungen. Netzwerke zur Stromübertragung (einschließlich der Verbindungen zwischen den Systemen) und/oder die Verteilungsinfrastruktur müssen wahrscheinlich verstärkt und ausgebaut werden, teilweise auch aufgrund der geographischen Verteilung und der unveränderlichen, entlegenen Lage vieler EE-Ressourcen. [8.2.1]

- *Fern- und Nahwärmesysteme* können EE-Quellen nutzen, die Niedrigtemperaturwärme liefern, wie etwa Solar- und Erdwärme oder auch Biomasse, einschließlich von Quellen mit wenigen alternativen Verwendungsmöglichkeiten wie Brennstoffe aus Abfällen. Für *Fernkühlung* können kalte natürliche Wasserläufe genutzt werden. Die Fähigkeit zur thermischen Speicherung und flexible Kraft-Wärme-Kopplung können Probleme von Angebots- und Bedarfsschwankungen lösen und in Elektrizitätssystemen als Demand-Response-Maßnahme dienen. [8.2.2]
- In *Gasnetze* könnte Biomethan oder in Zukunft EE-basierter Wasserstoff und synthetisches Erdgas für eine Reihe von Anwendungen eingespeist werden; die erfolgreiche Integration setzt allerdings voraus, dass entsprechende Gasqualitätsstandards eingehalten und die Leitungen bei Bedarf aufgerüstet werden. [8.2.3]
- Flüssige Biobrennstoffe für Verkehrsanwendungen und zum Kochen und Heizen können in *Flüssigbrennstoffverteilssysteme* integriert werden. Reine (100%-) Biokraftstoffe oder häufiger die mit erdölbasierten Kraftstoffen gemischten Biokraftstoffe müssen üblicherweise technische Standards erfüllen, die den Kraftstoffspezifikationen für Fahrzeugmotoren entsprechen. [8.2.4, 8.3.1]

**Es gibt vielfältige Wege, die EE-Anteile in allen Endverbrauchssektoren zu steigern. Die Integrationsfreundlichkeit variiert je nach Region, sektorspezifischen Eigenschaften und Technologie.**

- Im *Verkehrssektor* werden flüssige und gasförmige Biokraftstoffe schon heute und voraussichtlich auch in Zukunft in die Kraftstoffversorgungssysteme einer wachsenden Zahl von Ländern integriert. Zu den Integrationsoptionen können die dezentrale Vor-Ort-Produktion oder die zentralisierte Erzeugung von

<sup>9</sup> Elektrizitätswerke, welche Strom nach Bedarf erzeugen können, werden als „regelfähig“ klassifiziert [8.2.1.1, Anhang I]. Variable EE-Technologien sind teilweise regelfähig (d.h. nur bei Verfügbarkeit der EE-Ressource). CSP-Anlagen werden als regelfähig klassifiziert, wenn Wärme zur Nutzung bei Nacht oder bei geringer Sonneneinstrahlung gespeichert wird.

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Die englische Bezeichnung „dispatchable“ wird hier mit „regelfähig“ übersetzt.

EE-Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge und von EE-Strom für Schienen- und Elektrofahrzeuge gehören [8.2.1, 8.2.3] – abhängig von weiteren Entwicklungen im Bereich der Infrastruktur und der Fahrzeugtechnik. [8.3.1] Die künftige Nachfrage nach Elektrofahrzeugen könnte für den Einsatz flexibler Stromerzeugungssysteme ebenfalls förderlich sein. [8.2.1, 8.3.1]

- Im *Gebäudesektor* können EE-Technologien in Neu- und Altbauten zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kühlung genutzt werden. Dabei könnte es zu einem Angebot überschüssiger Energie kommen, insbesondere bei energieeffizienten Gebäuden. [8.3.2] In Entwicklungsländern ist die Integration von EE-Versorgungssystemen auch für bescheidene Wohnunterkünfte machbar. [8.3.2, 9.3.2]
- Landwirtschaftliche Betriebe sowie *industrielle Anlagen* zur Herstellung von Nahrungsmitteln und Farbstoffen verwenden häufig Biomasse, um den direkten Wärme- und Strombedarf vor Ort zu decken. Zudem könnten sie Überschüsse an Brennstoffen, Wärme und Strom an benachbarte Versorgungssysteme abgeben. [8.3.3, 8.3.4] Die verstärkte Integration von EE zur industriellen Nutzung ist in mehreren Teilsektoren möglich, beispielsweise durch elektrothermische Technologien oder längerfristig durch Einsatz von EE-Wasserstoff. [8.3.3]

**Die Kosten, die mit der EE-Integration verbunden sind, – sei es bei der Stromerzeugung, beim Heizen oder Kühlen, bei gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen – sind kontextabhängig, standortspezifisch und generell schwierig zu bestimmen.** Sie können Zusatzkosten für Investitionen in die Netzinfrastruktur, für den Systembetrieb und für Verluste sowie für andere gegebenenfalls notwendige Anpassungen vorhandener Energieversorgungssysteme umfassen. Es ist wenig Literatur zu Integrationskosten vorhanden und Schätzwerte fehlen häufig oder sie sind breit gestreut.

**Um hohen EE-Anteilen gewachsen zu sein, müssen Energiesysteme weiterentwickelt und angepasst werden.** [8.2, 8.3] Langfristige Integrationsmaßnahmen könnten beispielsweise Investitionen in die notwendige Infrastruktur sein oder Änderungen von institutionellen Rahmenbedingungen und Governance-Regimen; die Berücksichtigung sozialer Aspekte, von Märkten und Planungsbelangen sowie Kompetenzaufbau in Erwartung weiteren EE-Wachstums. [8.2, 8.3] Darüber hinaus wird die Integration weniger ausgereifter Techniken – wie z.B. durch neue Verfahren hergestellte Biokraftstoffe (auch als moderne Biokraftstoffe oder Biokraftstoffe der nächsten Generation bezeichnet), mithilfe von Solarenergie erzeugte Brennstoffe, Solar- Kühlung, Meeresenergie-Technologien, Brennstoffzellen und Elektrofahrzeuge – auch künftig Investitionen in die Forschung, Entwicklung und Demonstration, den Kompetenzaufbau und andere unterstützende Maßnahmen erfordern. [2.6, 3.7, 11.5, 11.6, 11.7]

EE könnten die künftige Energieversorgung und die Endverbrauchssysteme der Zukunft prägen, insbesondere bei der Stromerzeugung, bei der erwartet wird, dass global schneller höhere Anteile erreicht werden als bei den Wärme- oder Verkehrskraftstoffsektoren [10.3]. Mit diesem Trend könnten entsprechende parallele Entwicklungen bei Elektrofahrzeugen [8.3.1], bei der verstärkten Heizung und Kühlung mittels Elektrizität (einschließlich Wärmepumpen) [8.2.2, 8.3.2, 8.3.3], bei flexiblen Demand-Response-Dienstleistungen (einschließlich des Einsatzes intelligenter Zählersysteme\*) [8.2.1] sowie bei Energiespeichern und anderen Technologien einhergehen.

**Der Integration eines Portfolios von EE-Technologien sind im Rahmen der Weiterentwicklung von Infrastruktur und Energiesystemen trotz der Komplexitäten nur wenige oder gar keine grundlegenden technologischen Grenzen gesetzt, um an Orten, an denen geeignete EE-Ressourcen vorhanden sind oder bereitgestellt werden können, einen Hauptanteil am Gesamtenergiebedarf zu decken. Allerdings werden die tatsächliche Integrationsgeschwindigkeit und die sich hieraus ergebenden EE-Anteile durch Faktoren wie Kosten, politische Maßnahmen, sowie umweltbezogene und gesellschaftliche Aspekte beeinflusst.** [8.2, 8.3, 9.3, 9.4, 10.2, 10.5]

---

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Der englische Ausdruck „smart meters“ wird hier mit „intelligente Zählersysteme“ übersetzt.

## 5. Erneuerbare Energie und nachhaltige Entwicklung

**Historisch gesehen war wirtschaftliche Entwicklung immer eng mit zunehmendem Energieverbrauch und ansteigenden THG-Emissionen verbunden, wobei EE zur Entkopplung dieser Korrelation und zu nachhaltiger Entwicklung beitragen können.** Zwar muss der exakte Beitrag von EE zu nachhaltiger Entwicklung im landesspezifischen Kontext bewertet werden. EE können jedoch zur sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung, zum Zugang zu Energie, zur sicheren Energieversorgung, zur Minderung des Klimawandels und zur Verringerung negativer Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit beitragen. [9.2] Ein erweiterter Zugang zu modernen Energiedienstleistungen würde dazu beitragen, die Millennium-Entwicklungsziele zu erreichen. [9.2.2, 9.3.2]

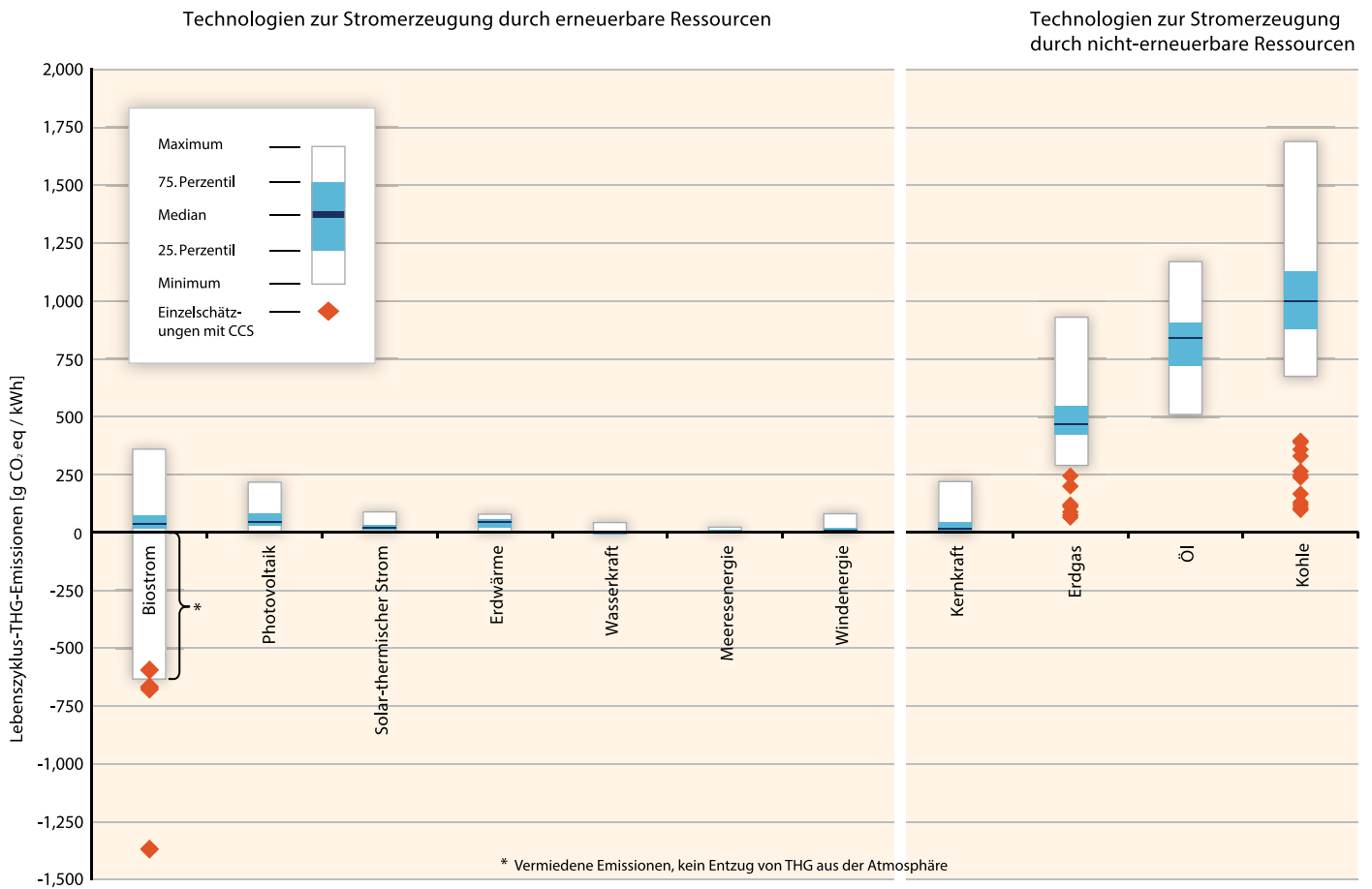
- **EE können zur sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung beitragen.** Unter günstigen Bedingungen sind Kostenersparnisse im Vergleich zur Nutzung von nicht-erneuerbaren Energiequellen gegeben, insbesondere in entlegenen und in armen ländlichen Gebieten ohne Zugang zu zentralisierter Energie. [9.3.1, 9.3.2.] Die mit Energieimporten verbundenen Kosten können häufig durch den Einsatz von schon jetzt wettbewerbsfähigen EE-Technologien im Land reduziert werden. [9.3.3] EE können sich positiv auf die Schaffung von Arbeitsplätzen auswirken, auch wenn sich die vorliegenden Untersuchungen in Bezug auf die Größenordnung der Nettobeschäftigung unterscheiden. [9.3.1]
- **EE können helfen, schneller Zugänge zu Energie zu schaffen, insbesondere für die 1,4 Milliarden Menschen ohne Zugang zu Elektrizität sowie die weiteren 1,3 Milliarden Menschen, die traditionelle Biomasse verwenden.** Ein elementarer Zugang zu modernen Energiedienstleistungen kann erhebliche Vorteile für eine örtliche Gemeinschaft oder einen Haushalt bieten. In vielen Entwicklungsländern haben dezentralisierte Netze auf EE-Basis und die Einbeziehung von EE in zentralisierte Energienetze den Zugang zu Energie ausgeweitet und verbessert. Zusätzlich bieten nicht-elektrische EE-Technologien auch Chancen zur Modernisierung von Energiedienstleistungen, beispielsweise die Nutzung von Solarenergie für die Warmwasserbereitung und das Trocknen von Agrarprodukten, Biokraftstoffe zum Transport, Biogas und moderne Biomasse zum Heizen, Kühlen, Kochen und Beleuchten sowie Wind für Wasserpumpen. [9.3.2, 8.1] Es ist anzunehmen, dass die Zahl der Menschen ohne Zugang zu modernen Energiedienstleistungen unverändert bleibt, wenn keine entsprechenden politischen Maßnahmen auf nationaler Ebene umgesetzt werden, gegebenenfalls unterstützt oder ergänzt durch angemessene internationale Hilfe. [9.3.2, 9.4.2]
- **EE-Optionen können zu einer sichereren Energieversorgung beitragen, jedoch sind spezifische Fragen der Integration zu berücksichtigen.** Der EE-Ausbau könnte die Anfälligkeit gegenüber Versorgungsunterbrechungen und Marktvolatilität reduzieren, wenn der Wettbewerb ausgeweitet und die Energiequellen diversifiziert werden. [9.3.3, 9.4.3] Szenariostudien deuten darauf hin, dass ohne technische Verbesserungen im Verkehrssektor Bedenken hinsichtlich einer sicheren Energieversorgung auch in Zukunft bestehen könnten. [2.8, 9.4.1.1, 9.4.3.1, 10.3] Die variablen Erzeugungsprofile einiger EE-Technologien machen häufig technische und institutionelle, an örtliche Bedingungen angepasste Maßnahmen notwendig, um eine zuverlässige Energieversorgung sicherzustellen. [8.2, 9.3.3]
- **Zusätzlich zu reduzierten THG-Emissionen bieten EE-Technologien in Bezug auf Umweltauswirkungen weitere Vorteile. Das Grad der Nutzung dieser Vorteile hängt von der speziellen Technologie, dem Management und den Standorteigenschaften des jeweiligen EE-Projekts ab.**
  - **Ökobilanzen (LCA\*) der Stromerzeugung mit EE-Technologien deuten darauf hin, dass THG-Emissionen generell bedeutend niedriger sind als beim Einsatz fossiler Brennstoffe und – in einer Reihe von Fällen – geringer als beim Einsatz fossiler Brennstoffe mit CCS\*.** Die Medianwerte für alle EE reichen von 4 bis 46 g CO<sub>2</sub>eq/kWh, während die Medianwerte für fossile Brennstoffe im Bereich von 469 bis 1001 g CO<sub>2</sub>eq/kWh liegen (ohne Emissionen aus Landnutzungsänderungen) (Abbildung SPM.8).

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Der englische Ausdruck „lifecycle assessment (LCA) wird hier mit „Ökobilanz“ übersetzt.



- **Die meisten derzeitigen Bioenergiesysteme einschließlich flüssiger Biokraftstoffe führen zu Reduzierungen von THG-Emissionen, und die meisten der Biokraftstoffe, die durch neue Prozesse hergestellt werden (auch als moderne Biokraftstoffe oder Biokraftstoffe der nächsten Generation bezeichnet) könnten eine stärkere Minderung von THG-Emissionen bewirken. Die THG-Bilanz kann durch Landnutzungsänderungen und damit verbundenen Emissionen und Senken beeinflusst werden.** Bioenergie kann THG-Emissionen aus Rückständen und Abfällen auf Deponien und Nebenprodukten vermeiden; die Kombination von Bioenergie mit CCS kann für weitere Reduzierungen sorgen (siehe Abbildung SPM.8). Die THG-Effekte aufgrund von Änderungen des gebundenen Kohlenstoffs durch Landmanagement und Landnutzung weisen beträchtliche Unsicherheiten auf. [2.2, 2.5, 9.3.4.1]
- **Die Nachhaltigkeit von Bioenergie, insbesondere hinsichtlich lebenszyklusbezogener THG-Emissionen, wird durch Praktiken der Bewirtschaftung von Land- und Biomasse-Ressourcen beeinflusst.** Direkte oder indirekte Änderungen der Land- und Forstnutzung oder ihres Managements durch die Biomasseproduktion zur Nutzung als Brennstoff, Strom oder Wärme können laut einer beträchtlichen Zahl von Studien die terrestrischen Kohlenstoffspeicher vermindern oder erhöhen. Dieselben Studien zeigen auch, dass indirekte Änderungen bei terrestrischen Kohlenstoffspeichern beträchtliche Unsicherheiten aufweisen, nicht direkt zu beobachten, komplex zu modellieren und nur schwer auf eine einzelne Ursache zurückzuführen sind. Die sachgerechte Regelung der Landnutzung, Flächenregelungen und Auswahl der Systeme zur Biomasseproduktion sind zentrale Fragen für politische Entscheidungsträger. [2.4.5, 2.5.1, 9.3.4, 9.4.4] Richtlinien bestehen, die sicherstellen sollen, die Vorteile von Bioenergie – wie ländliche Entwicklung, Gesamtverbesserung der Agrarbewirtschaftung und Beitrag zur Minderung des Klimawandels – auszuschöpfen; ihre Wirksamkeit wurde nicht untersucht. [2.2, 2.5, 2.8]
- **EE-Technologien, insbesondere Optionen, die nicht auf Verbrennung basieren, können hinsichtlich Luftverschmutzung und damit verbundener Gesundheitsprobleme Vorteile bieten.** [9.3.4.3, 9.4.4.1] Verbesserungen der Verwendung traditioneller Biomasse können die Luftverschmutzung in der örtlichen Umgebung und in Innenräumen erheblich reduzieren (neben THG-Emissionen, Entwaldung und Waldschädigung) und die damit verbundenen gesundheitlichen Folgen mildern, insbesondere für Frauen und Kinder in Entwicklungsländern. [2.5.4, 9.3.4.4]
- **Die Verfügbarkeit von Wasser könnte die Entscheidung für eine bestimmte EE-Technologie beeinflussen.** Konventionelle, wassergekühlte Wärmekraftwerke könnten gegenüber Wasserknappheit und Klimawandel besonders anfällig sein. In Gebieten, in denen Wasserknappheit schon heute ein Problem ist, können nicht-thermale EE-Technologien oder thermale EE-Technologien mit Trockenkühlung Energiedienstleistungen bereitstellen, ohne die Wasserressourcen zusätzlich zu belasten. Wasserkraftwerke und einige Bioenergie-Systeme sind auf die Verfügbarkeit von Wasser angewiesen und können die Konkurrenz entweder verstärken oder die Wasserknappheit mildern. Viele Auswirkungen können durch Standortüberlegungen und integrierte Planung gemildert werden. [2.5.5.1, 5.10, 9.3.4.4]
- **Standortspezifische Bedingungen werden das Maß bestimmen, in dem sich EE-Technologien auf die Biodiversität auswirken.** EE-spezifische Folgen für die Biodiversität können positiv oder negativ sein. [2.5, 3.6, 4.5, 5.6, 6.5, 9.3.4.6]
- **EE-Technologien weisen eine geringe Zahl an Todesopfern auf.** Unfall-Risiken von EE-Technologien sind nicht zu vernachlässigen, ihre häufig dezentrale Struktur schränkt jedoch das Potenzial katastrophaler Konsequenzen im Sinne von Todesfällen stark ein. Allerdings können Staudämme mancher Wasserkraftanlagen je nach standortspezifischen Faktoren ein besonderes Risiko darstellen. [9.3.4.7]

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: „CCS“ ist die Abkürzung des englischen Ausdrucks „Carbon Capture and Storage“, auf Deutsch „CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung“.



Anzahl Schätzungen	222(+4)	124	42	8	28	10	126	125	83(+7)	24	169(+12)
Anzahl Literaturquellen	52(+0)	26	13	6	11	5	49	32	36(+4)	10	50(+10)

**Abbildung SPM.8** | Schätzungen von Lebenszyklus-THG-Emissionen (in g CO<sub>2</sub>eq/kWh) für breite Kategorien von Stromerzeugungstechnologien sowie einiger Technologien mit integrierter CCS. Landnutzungsbezogene Nettoänderungen von gebundenem Kohlenstoff (hauptsächlich bei Biomasse und Wasserkraft aus Speicherbecken) und Auswirkungen des Landmanagements sind ausgenommen; negative Schätzwerte<sup>10</sup> für Biomasse beruhen auf Annahmen zu vermiedenen Emissionen von Rückständen und Abfällen auf Deponien, und Nebenprodukten. Die Literaturangaben und Methoden der Auswertung sind in Anhang II ausgewiesen. Die Zahl der Schätzungen ist größer als die Zahl der Literaturquellen, da in zahlreichen Studien mehrere Szenarien untersucht wurden. In Klammern ausgewiesene Zahlen beziehen sich auf zusätzliche Literaturquellen und Schätzungen, bei denen Technologien mit CCS ausgewertet wurden. Verteilungsangaben beziehen sich auf Schätzungen, die derzeit in der Ökobilanz-Literatur verfügbar sind, und nicht unbedingt auf zugrunde liegende theoretische oder praktische Extremwerte oder die wahre zentrale Tendenz, wenn alle Einsatzbedingungen berücksichtigt werden. [Abbildung 9.8, 9.3.4.1]

<sup>10</sup> Unter „geschätzten negativen Werten“ sind im Rahmen der Terminologie von Ökobilanzen, die im SRREN dargestellt werden, vermiedene Emissionen zu verstehen. Im Gegensatz zur Bioenergie in Kombination mit CCS werden der Atmosphäre durch vermiedene Emissionen keine THG entzogen.

## 6. Minderungspotenziale und Kosten

**Die Mehrzahl der in diesem Sonderbericht untersuchten 164 Szenarien deutet auf eine wesentliche Steigerung des Einsatzes von EE bis 2030, 2050 und danach hin<sup>11</sup>.** Im Jahr 2008 betrug die EE-Gesamtproduktion rund 64 EJ/Jahr (12,9% der gesamten Primärenergieversorgung), wovon über 30 EJ/Jahr auf traditionelle Biomasse entfielen. Über 50% der Szenarien projizieren für das Jahr 2050 einen EE-Einsatz in Höhe von über 173 EJ/Jahr, wobei in einigen Fällen mehr als 400 EJ/Jahr erreicht werden (Abbildung SPM.9). Da in den meisten Szenarien von einem Rückgang der Nutzung traditioneller Biomasse ausgegangen wird, wird beim Produktionsniveau von EE (ohne traditionelle Biomasse) eine entsprechende Steigerung auf das ungefähr Drei- bis auf mehr als das Zehnfache projiziert. Der Anteil von EE an der globalen Primärenergieversorgung unterscheidet sich in den einzelnen Szenarien erheblich. Mehr als die Hälfte der Szenarien weisen EE-Beiträge zur Primärenergieversorgung in Höhe von über 17% im Jahr 2030 auf, die auf mehr als 27% im Jahr 2050 ansteigen. Die Szenarien mit den höchsten EE-Anteilen erreichen rund 43% im Jahr 2030 und 77% im Jahr 2050. [10.2, 10.3]

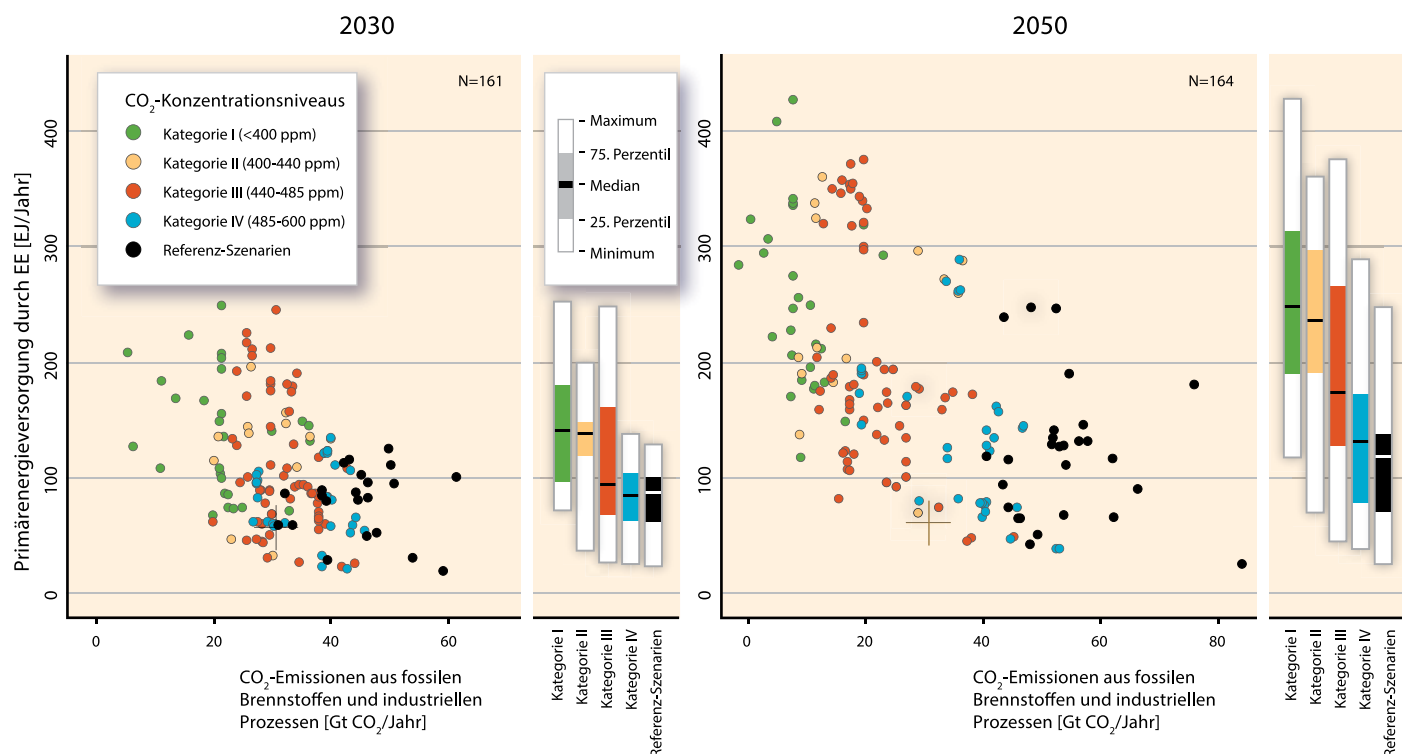
**Selbst in Referenzszenarien\* wird ein Ausbau der EE erwartet.** Die meisten Referenzszenarien gehen für das Jahr 2030 von einem EE-Ausbaustand aus, der mit bis zu 120 EJ/Jahr erheblich über dem Niveau des Jahres 2008 von 64 EJ/Jahr liegt. Bis 2050 wird in vielen Referenzszenarien ein EE-Ausbaustand von über 100 EJ/Jahr und in einigen Fällen von bis zu rund 250 EJ/Jahr erreicht (Abbildung SPM.9). Der unter Referenzbedingungen angezeigte Ausbau von EE ergibt sich aus einer Reihe von Annahmen, darunter beispielsweise ein im Verlauf des Jahrhunderts anhaltendes Wachstum der Nachfrage nach Energiedienstleistungen, die Fähigkeit von EE, zu einem erhöhten Zugang zu Energie beizutragen, sowie die langfristig begrenzte Verfügbarkeit fossiler Ressourcen. Weitere Annahmen in einigen Referenzszenarien (z.B. Verbesserungen der EE-Technologien bezüglich Kosten und Leistungsfähigkeit) bewirken, dass EE-Technologien in vielen Anwendungen auch ohne Klimapolitik zunehmend wirtschaftlich wettbewerbsfähig werden. [10.2]

**Der EE-Ausbaustand nimmt in Szenarien mit niedrigen THG-Stabilisierungskonzentrationen signifikant zu.** Szenarien mit THG-Stabilisierung auf niedrigem Niveau führen im Vergleich zum Referenzszenario im Durchschnitt zu einem höheren EE-Ausbaustand. Allerdings weisen die Szenarien für jedes langfristige THG-Konzentrationsziel eine große Bandbreite von EE-Ausbauständen aus (Abbildung SPM.9). In Szenarien, bei denen sich die atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf einem Niveau von weniger als 440 ppm stabilisieren, beläuft sich der Median des EE-Ausbaustandes im Jahr 2050 auf 248 EJ/Jahr (139 im Jahr 2030), wobei die höchsten Ausbaustände bis 2050 ein Niveau von 428 EJ/Jahr (252 im Jahr 2030) erreichen. [10.2]

**Kohlenstoffarme Energieversorgungsoptionen und Energieeffizienzverbesserungen können in vielen Kombinationen zum Erreichen niedriger THG-Konzentrationsniveaus beitragen; dabei werden EE in den meisten Szenarien bis 2050 zur vorherrschenden kohlenstoffarmen Energieversorgungsoption.** Diese große Bandbreite der Ergebnisse ist auf unterschiedliche Annahmen über eine Reihe von Faktoren zurückzuführen. Dazu gehören Weiterentwicklungen von EE-Technologien (einschließlich Bioenergie mit CCS) und die zugehörigen Ressourcengrundlagen und Kosten, die Attraktivität anderer Minderungsoptionen (z.B. Energieeffizienzsteigerung beim Endverbrauch, Kernenergie, fossile Energie mit CCS), Verbrauchs- und Produktionsmuster, grundsätzliche Einflussfaktoren des Energiedienstleistungsbedarfs (einschließlich der künftigen Bevölkerungszahl und des Wirtschaftswachstums), die Integrationsfähigkeit variabler EE in Stromnetze, fossile Brennstoffressourcen, spezielle Klimaschutzrichtlinien sowie unterschiedliche Emissionsentwicklungen zu langfristigen Konzentrationsniveaus. [10.2]

<sup>11</sup> Zu diesem Zweck wurden 164 globale Szenarien aus 16 verschiedenen groß-skaligen integrierten Modellen bewertet. Zwar ermöglicht das Szenario-Set eine sinnvolle Beurteilung der Unsicherheiten, die untersuchten 164 Szenarien stellen jedoch keine vollständig zufällige Stichprobe dar, die sich für eine strenge statistische Analyse eignet. Zudem bilden die analysierten Szenarien nicht immer das gesamte EE-Portfolio ab (beispielsweise wird Meeresenergie bisher nur in wenigen Szenarien untersucht) [10.2.2]. Für eine eingehendere Analyse wurden vier illustrative Szenarien aus dem Set der 164 herangezogen. Diese vier Szenarien umfassen ein Referenzszenario ohne konkrete Minderungsziele und drei Klimaschutzszenarien mit unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Stabilisierungsniveaus. [10.3]

\* Anmerkung der deutschen Redaktion: Der Englische Ausdruck „baseline scenario“ wird hier mit „Referenzszenario“ übersetzt.



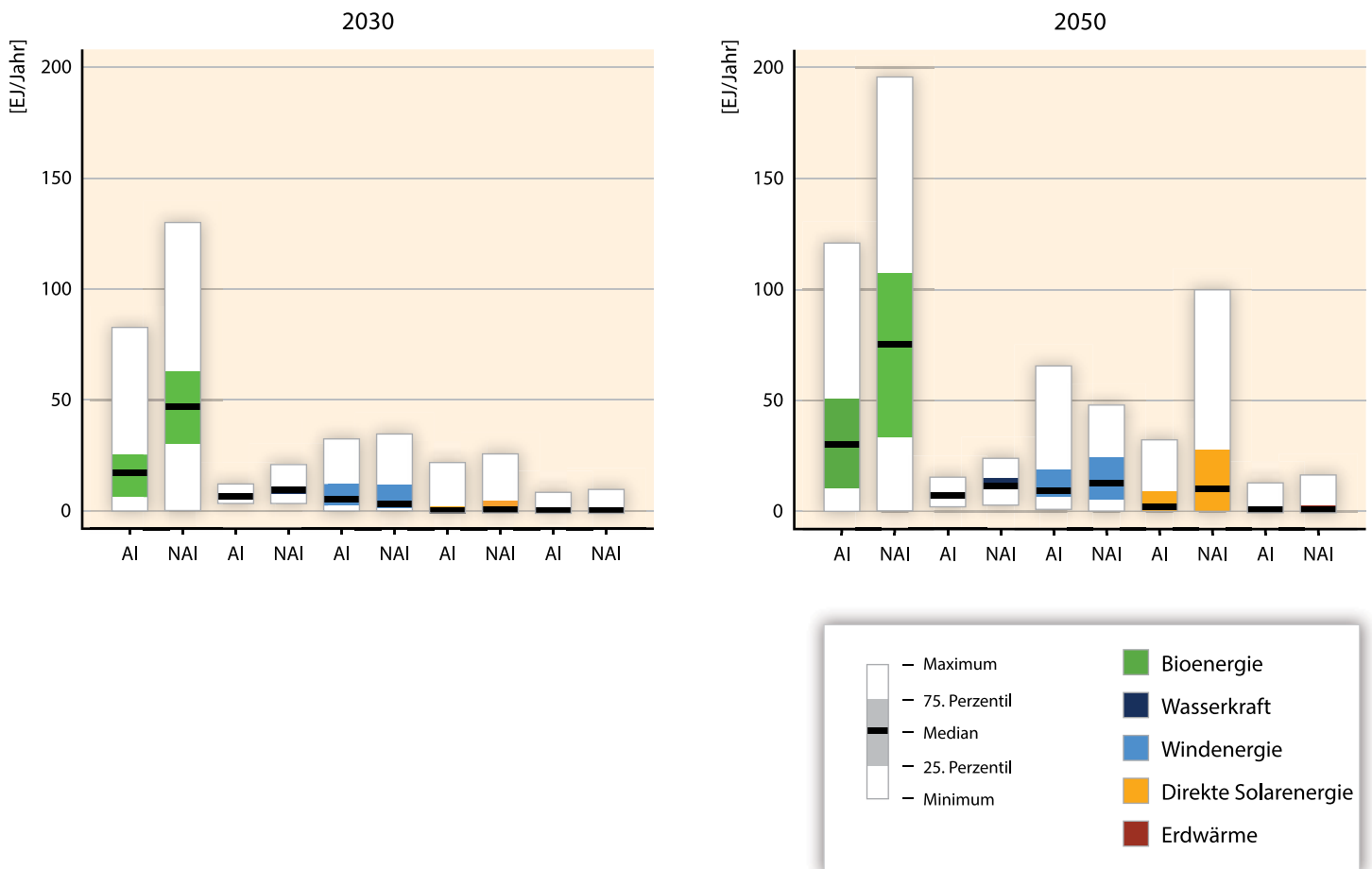
**Abbildung SPM.9** | Globale Primärenergieversorgung durch EE (direktes Äquivalent) aus 164 langfristigen Szenarien aufgetragen gegen fossile und industrielle CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Jahren 2030 und 2050. Die Farben beruhen auf Kategorien der Stabilisierungsniveaus der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration, die konsistent mit denen in AR4 definiert wurden. Die Balkendiagramme rechts von den Streudiagrammen zeigen die Ausbaustände von EE in der jeweiligen Kategorie atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die dicke schwarze Linie entspricht dem Median, der farbige Bereich reicht vom unteren zum oberen Perzentil (25. bis 75.) und die weißen Bereiche decken die gesamte Bandbreite aller untersuchten Szenarien ab. Die grauen Kreuze zeigen die Verhältnisse im Jahr 2007. [Abbildung 10.2, 10.2.2.2]

Anmerkungen: Wegen der Datenverfügbarkeit sind in den hier ausgewiesenen Ergebnissen für 2030 statt des Gesamtsets von 164 Szenarien nur 161 berücksichtigt. EE-Ausbaustände, die unter denen von heute liegen, ergeben sich aus Modellergebnissen und Unterschieden der Bilanzierung traditioneller Biomasse. Zur Erklärung der „direkten Äquivalenz-Methode“ zur Bestimmung der Primärenergieversorgung und zur sorgfältigen Interpretation der Szenarioergebnisse, siehe Box SPM.2. Ebenfalls zu beachten ist, dass die Kategorien V und darüber nicht berücksichtigt sind und die Kategorie IV von 570 ppm auf 600 ppm ausgedehnt wurde, da sämtliche Stabilisierungsszenarien unter 600 ppm CO<sub>2</sub> im Jahr 2100 liegen und weil die niedrigsten Referenzszenarien bis 2100 Konzentrationsniveaus von etwas mehr als 600 ppm erreichen.

**Die Szenarioanalyse in diesem Sonderbericht weist darauf hin, dass EE ein großes Potenzial zur Minderung von THG-Emissionen haben.** Die vier illustrativen Szenarien zeigen eine Bandbreite globaler kumulierter CO<sub>2</sub>-Einsparungen von rund 220 bis 560 Gt CO<sub>2</sub> von 2010 bis 2050. Im Vergleich dazu weist das Referenzszenario des IEA World Energy Outlook 2009 für den gleichen Zeitraum rund 1530 Gt kumulative fossile und industrielle CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Die genaue Zuordnung von Minderungspotenzialen zu EE hängt von der Rolle ab, die den verschiedenen Minderungstechnologien in den Szenarien zugewiesen wird, vom komplexen Systemverhalten und insbesondere von den Energiequellen, die durch EE ersetzt werden. Daher ist die Zuordnung genauer Minderungspotenziale zu EE mit angemessener Vorsicht zu betrachten. [10.2, 10.3, 10.4]

**Die Szenarien zeigen generell, dass weltweit ein verbreitetes Wachstum der EE stattfinden wird.** Auch wenn die genaue regionale Verteilung des EE-Ausbaus in den Szenarien erheblich variiert, stimmen die Szenarien weitgehend darin überein, dass der EE-Ausbau weltweit verbreitet wächst. Dabei ist bei den meisten Szenarien der EE-Gesamtausbaustand in der Gruppe der Nicht-Annex-I-Länder<sup>12</sup> langfristig höher als in der Gruppe der Annex-I-Länder (Abbildung SPM.10). [10.2, 10.3]

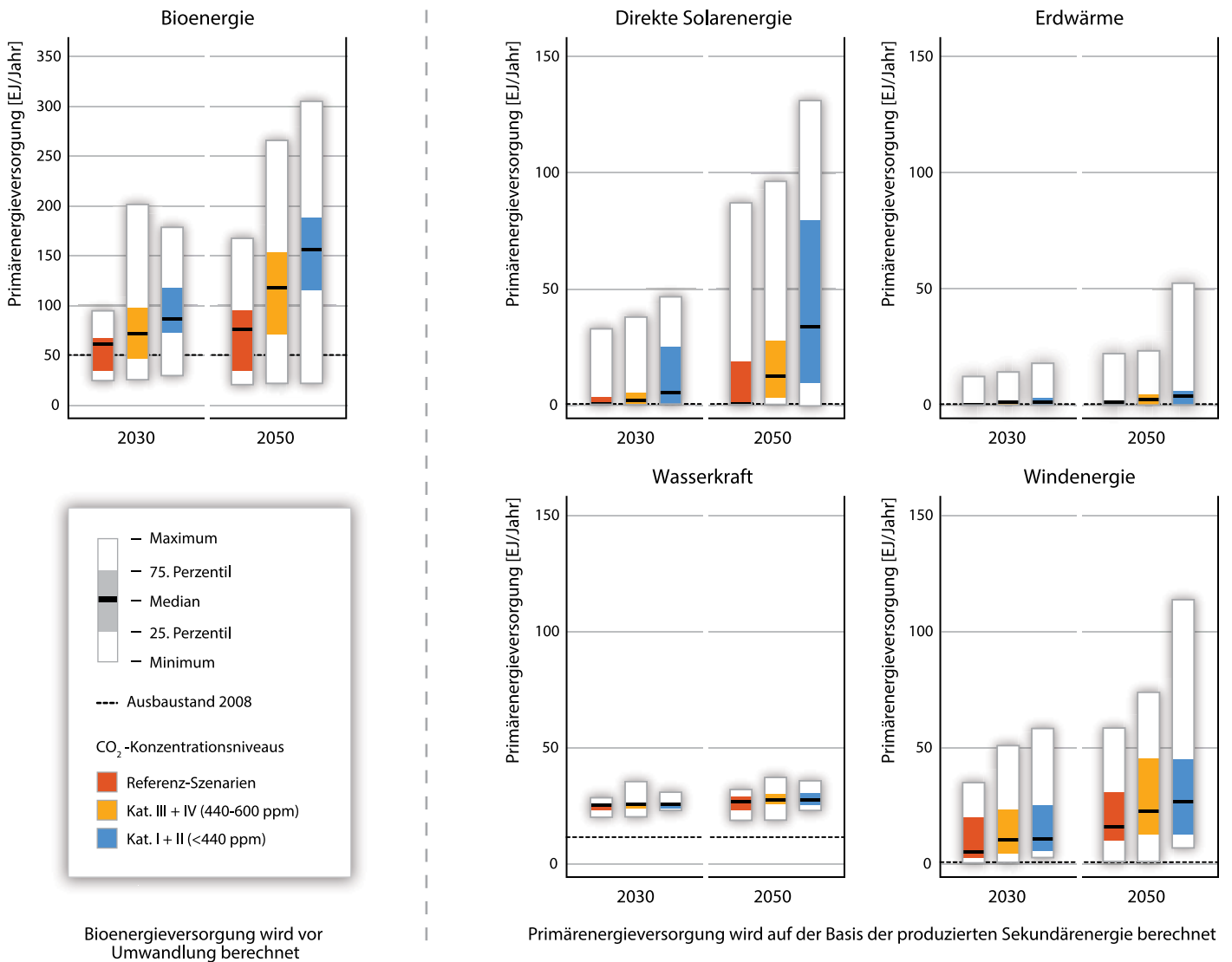
<sup>12</sup> Die Länderkategorien „Annex I“ und „Nicht-Annex-I“ sind im Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) definiert.



**Abbildung SPM.10** | Globale Primärenergieversorgung durch EE (direktes Äquivalent) nach Quellen in der Gruppe der Annex I- (AI) und in der Gruppe der Nicht-Annex-I (NAI)-Länder in 164 langfristigen Szenarien bis 2030 und bis 2050. Die dicke schwarze Linie entspricht dem Median, der farbige Bereich reicht vom unteren zum oberen Perzentil (25. bis 75.) und die weißen Bereiche decken die gesamte Bandbreite aller untersuchten Szenarien ab. [Abbildung 10.8, 10.2.2.5]

Anmerkungen: Zur Erklärungen der „direkten Äquivalenz-Methode“ zur Bestimmung der Primärenergieversorgung und zur sorgfältigen Interpretation der Szenarioergebnisse, siehe Box SPM.2. Konkret kann für das Jahr 2050 in den Szenarien mit höheren Ausbauständen von einer vergleichbaren Größenordnung der Bandbreiten der Sekundärenergie aus Bioenergie, Windenergie und direkter Solarenergie ausgegangen werden. Meeresenergie wird hier nicht dargestellt, da diese EE-Technologie nur in sehr wenigen Szenarien abgebildet wird.

**Die Szenarien weisen nicht auf eine offenkundig vorherrschende EE-Einzeltechnologie auf globaler Ebene hin; darüber hinaus wird der künftige Beitrag von EE nicht durch die globalen technischen Gesamtpotenziale eingeschränkt.** Auch wenn der Beitrag von EE-Technologien in den verschiedenen Szenarien variiert, entfallen die größten Beiträge von EE-Technologien zum Energiesystem bis 2050 meist auf moderne Biomasse, Windenergie und direkte Solarenergie (Abbildung SPM.11). Alle untersuchten Szenarien bestätigen, dass technische Potenziale im globalen Maßstab keine begrenzenden Faktoren für die Ausbreitung von EE sein werden. Trotz bedeutender technologischer und regionaler Unterschiede werden in den vier illustrativen Szenarien weniger als 2,5% des weltweit verfügbaren technischen EE-Potenzials ausgeschöpft. [10.2, 10.3]



**Abbildung SPM.11** | Globale Primärenergieversorgung (direktes Äquivalent) von Bioenergie, Windenergie, direkter Solarenergie, Wasserkraft und Erdwärme in 164 langfristigen Szenarien in den Jahren 2030 und 2050, gruppiert nach verschiedenen, konsistent mit AR4 definierten Kategorien des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveaus. Die dicke schwarze Linie entspricht dem Median, der farbige Bereich reicht vom unteren zum oberen Perzentil (25. bis 75.) und die weißen Bereiche decken die gesamte Bandbreite aller untersuchten Szenarien ab. [Auszug aus Abbildung 10.9, 10.2.2.5]

Anmerkung: Zur Erklärung der „direkten Äquivalenz-Methode“ zur Bestimmung der Primärenergieversorgung und zur sorgfältigen Interpretation der Szenarioergebnisse, siehe Box SPM.2. Konkret kann für das Jahr 2050 in den Szenarien mit höheren Ausbauständen von einer vergleichbaren Größenordnung der Bandbreiten der Sekundärenergie aus Bioenergie, Windenergie und direkter Solarenergie ausgegangen werden. Meeresenergie wird hier nicht dargestellt, da diese EE-Technologie nur in sehr wenigen Szenarien abgebildet wird. Ebenfalls zu beachten ist, dass die Kategorien V und darüber nicht berücksichtigt sind und die Kategorie IV von 570 ppm auf 600 ppm ausgedehnt wurde, da sämtliche Stabilisierungsszenarien unter 600 ppm CO<sub>2</sub> im Jahr 2100 liegen und weil die niedrigsten Referenzszenarien bis 2100 Konzentrationsniveaus von etwas mehr als 600 ppm erreichen.

**Einzelne Studien weisen darauf hin, dass bei begrenztem EE-Ausbau die Minderungskosten ansteigen und niedrige THG-Konzentrationsstabilisierungen möglicherweise nicht erreicht werden.**

In einer Reihe von Sensitivitätsstudien wurden in den Szenarien Beschränkungen für die Einführung bestimmter Minderungsoptionen – einschließlich EE sowie Kernenergie und fossiler Energie mit CCS – angenommen. Bezüglich der genauen Größe des Kostenanstiegs gibt es wenig Übereinstimmung. [10.2]

**Die Umstellung auf eine THG-arme Wirtschaft mit höheren EE-Anteilen würde eine Steigerung der Investitionen in Technologien und Infrastruktur erfordern.**

Nach den im SRREN detailliert analysierten vier illustrativen Szenarien liegen Schätzwerte für die globalen kumulativen EE-Investitionen (nur im Stromerzeugungssektor) für die Dekade 2011-2020 in einem Bereich zwischen 1,36 und 5,1 Billionen USD<sub>2005</sub> und für die Dekade 2021-2030 in einem Bereich zwischen 1,49 und 7,18 Billionen USD<sub>2005</sub>. Die niedrigeren Werte beziehen sich auf das Referenzszenario des IEA World Energy Outlook 2009 und die höheren Werte auf ein Szenario, bei dem eine Stabilisierung der Konzentration (nur) des atmosphärischen CO<sub>2</sub> auf 450 ppm angestrebt wird. Die jährlichen Durchschnittswerte des jeweiligen Investitionsbedarfs liegen damit sämtlich unter einem Prozent des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP). Neben Unterschieden in der Konzeption der zur Untersuchung dieser Szenarien angewandten Modelle lässt sich die Bandbreite der Werte hauptsächlich mit Differenzen bei den angestrebten THG-Konzentrationsniveaus und mit Einschränkungen in Bezug auf die Zulässigkeit von bestimmten Minderungstechnologien erklären. Durch eine Steigerung der installierten Kapazität von EE-Kraftwerken wird die Menge fossiler und atomarer Brennstoffe reduziert, die andernfalls zur Deckung eines bestimmten Strombedarfs notwendig wäre. Zusätzlich zu Investitions-, Betriebs- und Wartungs- sowie (gegebenenfalls) Rohstoffkosten in Bezug auf EE-Kraftwerke müssen bei jeder Beurteilung der wirtschaftlichen Gesamtbelastung, die mit ihrem Einsatz verbunden ist, auch vermiedene Kosten für Brennstoffe und Ersatzinvestitionen berücksichtigt werden. Selbst ohne Berücksichtigung der vermiedenen Kosten liegt der untere Bereich der oben besprochenen Investitionen zur EE-Stromerzeugung unter den für 2009 ausgewiesenen entsprechenden Investitionen. Die höheren Jahresdurchschnittswerte der Investitionen des EE-Stromerzeugungssektors entsprechen etwa einer Verfünffachung der aktuellen globalen Investitionen in diesem Bereich. [10.5, 11.2.2]

## 7. Politikmaßnahmen, Umsetzung und Finanzierung

**Eine zunehmende Zahl und Vielfalt von EE-Politikmaßnahmen – motiviert durch eine Vielzahl von Faktoren – haben das beschleunigte Wachstum der EE-Technologien in den letzten Jahren vorangetrieben.**

[1.4, 11.2, 11.5, 11.6] Staatliche Politikmaßnahmen spielen bei der Beschleunigung des Ausbaus von EE-Technologien eine entscheidende Rolle. Dabei sind in den meisten Entwicklungsländern der Zugang zu Energie sowie die soziale und wirtschaftliche Entwicklung die Hauptmotivation, wohingegen für Industrieländer eine sichere Energieversorgung sowie Umweltbelange am wichtigsten sind [9.3, 11.3]. Im Fokus der politischen Maßnahmen liegen über die bisherige Konzentration auf EE-Strom hinaus zunehmend auch EE für Heizung, Kühlung und Verkehr. [11.2, 11.5]

EE-spezifische Politikmaßnahmen für Forschung, Entwicklung, Demonstration und Ausbau tragen zur Angleichung der Wettbewerbsbedingungen für EE bei. Diese politischen Maßnahmen umfassen Regulierungen wie Einspeisevergütungen, Quoten, vorrangiger Netzzugang, Bauvorschriften, Auflagen zur Beimischung von Biokraftstoffen und Bioenergienachhaltigkeitskriterien. [2.4.5.2, 2.ES, TS.2.8.1] Andere Politikategorien sind fiskalische Anreize wie steuerpolitische Maßnahmen und direkte staatliche Zahlungen wie Nachlässe und Zuschüsse sowie staatliche Finanzierungsmechanismen wie Darlehen und Bürgschaften. Weiter gefasste Politikmaßnahmen zur Reduzierung von THG-Emissionen, wie etwa die Bepreisung von Kohlenstoff, können EE ebenfalls unterstützen.

Die politischen Maßnahmen können sektorspezifisch sein sowie auf kommunaler, bundesstaatlicher/provinzieller, nationaler und in einigen Fällen regionaler Ebene umgesetzt und durch bilaterale, regionale und internationale Kooperation ergänzt werden. [11.5]



**Indem sie dazu beigetragen haben, verschiedene Hemmnisse zu überwinden, haben die politischen Maßnahmen die Steigerung der installierten EE-Kapazität gefördert.** [1.4, 11.1, 11.4, 11.5, 11.6] Zu den Hemmnissen für den Ausbau der EE zählen:

- Institutionelle und politische Hemmnisse im Zusammenhang mit bestehender Industrie, Infrastruktur und Regulierung des Energiesystems;
- Marktversagen einschließlich, soweit anwendbar, nicht internalisierter Umwelt- und Gesundheitskosten;
- das Fehlen allgemeiner Informationen und des Zugangs zu Daten, die für den Einsatz von EE relevant sind, sowie Fehlen von technischer Kapazität und Fachkenntnissen; und
- Hemmnisse im Zusammenhang mit gesellschaftlichen und persönlichen Werten, die sich auf die Wahrnehmung und Akzeptanz von EE-Technologien auswirken. [1.4, 9.5.1, 9.5.2.1]

**Staatliche FuE-Investitionen in EE-Technologien sind am effektivsten, wenn sie durch andere politische Instrumente, insbesondere zur Ausbauförderung, ergänzt werden, mit denen gleichzeitig die Nachfrage nach neuen Technologien gesteigert wird.** Zusammengenommen lassen FuE- und Ausbauförderung eine positive Rückkopplung entstehen, die Investitionen des Privatsektors auslöst. Werden Ausbauförderungsmaßnahmen schon in einer frühen Entwicklungsphase einer bestimmten Technologie umgesetzt, können Lernprozesse durch private FuE beschleunigt werden, was wiederum die Kosten weiter reduziert und zusätzliche Anreize für die Nutzung der Technologie bietet. [11.5.2]

**Manche politische Maßnahmen für die rasche Steigerung des EE-Ausbaus haben sich nachweislich als effektiv und effizient erwiesen. Es gibt jedoch keine Universalstrategie.** Die Erfahrung zeigt, dass verschiedene Faktoren darauf Einfluss nehmen, wie effektiv und effizient unterschiedliche politische Maßnahmen oder Kombinationen politischer Maßnahmen sein können. Dazu gehören der Grad der technischen Reife, das verfügbare Kapital, die Schwierigkeit der Integrierbarkeit in das bestehende System sowie das örtliche und landesweit vorhandene EE-Potenzial. [11.5]

- Mehrere Studien zeigen, dass sich einige Einspeisevergütungen zur Förderung von EE-Strom als effektiv und effizient erwiesen haben, hauptsächlich aufgrund der Kombination aus langfristig festgelegten Preisen bzw. Preisaufschlägen, Netzanbindungen und garantierter Abnahme des gesamten erzeugten EE-Stroms. Quotenregelungen können effektiv und effizient sein, wenn sie Risiken vermindern, beispielsweise durch langfristige Verträge. [11.5.4]
- Eine zunehmende Zahl von Staaten beschließt Steueranreize für das Heizen und Kühlen mit EE. Verpflichtungen zur Nutzung von EE-Wärme gewinnen immer mehr Aufmerksamkeit, da sie Wachstum unabhängig von staatlicher finanzieller Förderung anregen können. [11.5.5]
- Im Verkehrssektor sind Kraftstoffquoten oder Beimischungsaufgaben zentrale Faktoren bei der Entwicklung moderner Industrien zur Biokraftstoffbereitstellung. Weitere politische Maßnahmen sind direkte staatliche Zahlungen oder Steuersenkungen. Politische Maßnahmen haben sich auf die Entstehung eines internationalen Biokraftstoffhandels ausgewirkt. [11.5.6]

Wichtig ist die Flexibilität, sich an die Entwicklung von Technologien, Märkten und anderen Faktoren anzupassen. Details der Konzeption und Umsetzung bestimmen die Effektivität und Effizienz einer Politikmaßnahme. [11.5] Transparente und beständige politische Rahmenbedingungen können Investitionsrisiken reduzieren und den Ausbau von EE sowie die Entstehung kostengünstiger Anwendungen erleichtern. [11.5, 11.6]

**Durch „in die Lage versetzende“ Politikmaßnahmen werden die Entwicklung und der Ausbau von EE unterstützt.** Ein begünstigendes oder „in die Lage versetzendes“ Umfeld für EE kann geschaffen werden, indem die möglichen Wechselwirkungen einer bestimmten Politik mit anderen EE-Politikmaßnahmen sowie mit der Energiepolitik und anderen Politiken außerhalb des Energiebereichs (z.B. Landwirtschafts-, Verkehrs-, Wasserwirtschafts- und Stadtplanungspolitik) berücksichtigt werden, für Entwickler von EE der Zugang zu Kapital und günstigen Standorten erleichtert wird, Hemmnisse für den Zugang zu Netzen und Märkten für EE-Anlagen und deren erzeugte Energie beseitigt werden, der Kenntnisstand und das Problembewusstsein durch gezielte Kommunikations- und Dialoginitiativen gesteigert werden sowie Möglichkeiten für einen Technologietransfer geschaffen werden. Umgekehrt kann das Vorhandensein eines „in die Lage versetzenden“ Umfelds die Effizienz und Effektivität politischer Maßnahmen zur Förderung von EE erhöhen. [9.5.1.1, 11.6]

**Zwei voneinander unabhängige Marktversagen liegen der zusätzlichen Unterstützung von innovativen EE-Technologien mit hohem Potenzial für technische Entwicklungen zugrunde, selbst wenn ein Emissionsmarkt (oder generell eine THG-Preispolitik) vorhanden ist.** Das erste Marktversagen bezieht sich auf die externen Kosten von THG-Emissionen. Das zweite Marktversagen liegt im Bereich der Innovation: Wenn Firmen die künftigen Vorteile von Investitionen in junge, sich entwickelnde EE-Technologien unterschätzen oder sie sich diese Vorteile nicht zueigen machen können, werden sie weniger investieren, als aus gesamtwirtschaftlicher Sicht optimal ist. Zusätzlich zu politischen Maßnahmen zur THG-Preisgestaltung können aus wirtschaftlicher Sicht EE-spezifische Politikmaßnahmen angebracht sein, wenn auf die entsprechenden Chancen zur technologische Entwicklung abgezielt wird (oder wenn andere Ziele zusätzlich zur Minderung des Klimawandels verfolgt werden). Potenziell nachteilige Folgen wie Lock-in-Effekte, Emissionsverlagerungen und Rebound-Effekte sollten bei der Gestaltung eines Politikportfolios berücksichtigt werden. [11.1.1, 11.5.7.3]

**Die Literatur deutet darauf hin, dass langfristige Ziele für EE sowie die Flexibilität, aus Erfahrungen zu lernen, für die kostengünstige und weite Verbreitung von EE von entscheidender Bedeutung sind.** Dies würde eine systematische Entwicklung politischer Rahmenregelungen erfordern, mit denen Risiken reduziert und attraktive Renditen ermöglicht werden, die während eines investitionsrelevanten Zeithorizonts für Stabilität sorgen. Ein sachgerechter und zuverlässiger Mix politischer Instrumente einschließlich politischer Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung ist besonders wichtig, wo die Energieinfrastruktur noch entwickelt wird und zu erwarten ist, dass der Energiebedarf künftig zunehmen wird. [11.5, 11.6, 11.7]

## 8. Erweiterung des Kenntnisstands über erneuerbare Energie

Verbesserte wissenschaftliche und technologische Kenntnisse sollten zu Leistungssteigerungen und Kostensenkungen bei EE-Technologien führen. Zusätzliches Wissen über EE und ihre Rolle bei der Reduzierung von THG-Emissionen ist noch in einer Reihe von Bereichen zu erschließen, darunter: [Näheres siehe Tabelle 1.1]

- künftige Kosten und zeitlicher Verlauf des EE-Ausbaus,
- realisierbares technisches Potenzial für EE in allen geographischen Maßstäben,
- technische und institutionelle Herausforderungen und Kosten der Integration vielfältiger EE-Technologien in Energiesysteme und Energiemärkte,
- umfassende Untersuchungen und Bewertungen sozioökonomischer und ökologischer Aspekte von EE und anderen Energietechnologien,
- Möglichkeiten, mit nachhaltigen EE-Dienstleistungen Bedarfe von Entwicklungsländern zu decken und

- politische, institutionelle und finanzielle Mechanismen, die einen kostengünstigen Ausbau von EE unter vielfältigen Bedingungen ermöglichen.

Der Wissensstand über EE und deren Potenzial zur Minderung des Klimawandels wächst weiterhin. Der bereits vorhandene wissenschaftliche Kenntnisstand ist bedeutend und kann zu Entscheidungen herangezogen werden. [1.1.8]

