

CSC Report 14

Der deutsche Energiesektor und seine mögliche Betroffenheit durch den Klimawandel

Synthese der bisherigen Aktivitäten und Erkenntnisse



Titelbild: © Hardy/ Fotolia, acilo/ istockphoto.com, RobertHoetink/ istockphoto.com

Zitierhinweis:

J. Cortekar, M. Groth (2013): Der deutsche Energiesektor und seine mögliche Betroffenheit durch den Klimawandel. Synthese der bisherigen Aktivitäten und Erkenntnisse, CSC Report 14, Climate Service Center, Germany

Der deutsche Energiesektor und seine mögliche Betroffenheit durch den Klimawandel

Synthese der bisherigen Aktivitäten und Erkenntnisse

Autoren: Dr. Jörg Cortekar, Dr. Markus Groth
Abteilung „Ökonomie und Politik“ am Climate Service Center (CSC)

Dieser CSC-Report ist auch online auf www.climate-service-center.de erhältlich.

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG	4
TEIL A GRUNDLAGEN	5
1. HINTERGRUND UND STRUKTUR DER SYNTHESE	5
2. DER KLIMAWANDEL UND MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN	7
3. DER ENERGIESEKTOR	10
3.1 Struktur des Energiesektors	10
3.2 Zukünftige Entwicklungen	12
4. BISHERIGE AKTIVITÄTEN	15
TEIL B VULNERABILITÄT DES ENERGIESEKTORS	17
5. ENERGIEGEWINNUNG UND -VERFÜGBARKEIT	17
5.1 Konventionelle Energieträger	17
5.2 Regenerative Energieträger	19
6. ENERGIEERZEUGUNG UND -UMWANDLUNG	21
6.1 Konventionelle Energieträger	21
6.2 Regenerative Energieträger	22
7. VERTEILUNG	24
TEIL C SCHLUSSBETRACHTUNGEN	26
8. ERGEBNISDARSTELLUNG UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	26
LITERATUR	30
INTERNETQUELLEN	33

Einleitung

Von den möglichen Auswirkungen des Klimawandels wird eine Vielzahl gesellschaftlicher Bereiche betroffen sein. Es stellt sich die Frage, wie sie auf die anstehenden Veränderungen vorbereitet werden können. Auch für Unternehmen sind mit dem Klimawandel aber nicht nur neue Herausforderungen verbunden, die es zu bewältigen gilt, sondern er birgt auch Chancen, die ergriffen werden können.

Um Entscheidungsträger in die Lage zu versetzen, fundierte Entscheidungen zum Umgang mit dem Klimawandel zu treffen, ist eine ebenso umfassende wie ausgewogene und verständliche Informationsbereitstellung für die verschiedenen gesellschaftlichen und ökonomischen Bereiche notwendig. Einer dieser Bereiche ist die Energieversorgung. Dem Energiesektor kommt gesamtgesellschaftlich eine große Bedeutung zu. Zum einen ist die Energieinfrastruktur eine sogenannte „kritische Infrastruktur“, denn ihr Ausfall oder ihre Beeinträchtigung kann zu nachhaltig wirkenden Versorgungsengpässen, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder anderen dramatischen Problemen führen. Zum anderen befindet sich der deutsche Energiesektor im Rahmen der Energiewende in einem umfassenden Transformationsprozess.

Eine ausführliche Bestandsaufnahme des Wissensstandes zu klimabedingten Verletzlichkeiten und weiteren Herausforderungen des deutschen Energiesektors liegt jedoch noch nicht vor. Diese Lücke wird hier nun geschlossen.

In **Abschnitt A** werden hierzu zunächst die Grundlagen aufgearbeitet; dies umfasst eine kurze Darstellung der bisherigen Erkenntnisse zum Klimawandel sowie des deutschen Energiesektors. Anschließend werden bisherige Aktivitäten zur Wissensgenerierung über die Verletzlichkeit des deutschen Energiesektors dargestellt: Welche Akteure waren aktiv? Mit welchen Fragen haben sich diese wann beschäftigt? Gab es bereits Aktivitäten in der Gesellschaft und / oder der Wirtschaft vor der Verabschiedung der europäischen bzw. der Deutschen Anpassungsstrategie?

In **Abschnitt B** werden die Ergebnisse zusammengeführt und entlang der Wertschöpfungskette des Energiesektors – Gewinnung der Rohstoffe, Energieerzeugung bzw. Umwandlung und Verteilung der Energie über Netze – dargestellt. Hierbei wird der Schwerpunkt auf die physischen Beeinträchtigungen gelegt. Aus diesem Grund wird darauf verzichtet, mögliche nachfrageinduzierten Anpassungsnotwendigkeiten oder Einflüsse der Politik eingehender zu betrachten.

Im abschließenden **Abschnitt C** werden die Ergebnisse zusammengeführt. Hierbei wird auf widerstreitende Argumente oder bisher in der Diskussion nicht aufgeworfene Fragen aufmerksam gemacht um daraus möglichen weiteren Handlungsbedarf abzuleiten.

Grundsätzlich zeigt die Synthese, dass alle hier betrachteten Bereiche der Wertschöpfungskette zumeist negativ betroffen sein werden. Die wesentlichen Einflussfaktoren werden dabei das Wasserdargebot, Extremwetterereignisse und steigende Durchschnittstemperaturen sein. Auch wenn sich bei einzelnen Aspekten unterschiedliche Einschätzungen hinsichtlich der Betroffenheiten gezeigt haben, so kann festgehalten werden, dass die Verletzlichkeit in Deutschland insgesamt als gut handhabbar einzuschätzen ist – insbesondere wenn die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels schon jetzt bei den anstehenden Infrastrukturmaßnahmen im Zuge der Energiewende Berücksichtigung finden und die Transformation der Energiesysteme auch zur Beseitigung entsprechender Schwachstellen genutzt wird.

Insgesamt wird also deutlich, dass neben Ansätzen zur Vermeidung des Klimawandels zunehmend auch eine Anpassung an dessen nicht mehr abwendbare Folgen notwendig ist. Dabei ist gerade der Energiesektor prädestiniert dafür, Synergien zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung zu nutzen.

Teil A Grundlagen

1. Hintergrund

Die Folgen des Klimawandels mögen in Deutschland derzeit noch etwas abstrakt und unkonkret erscheinen, doch es ist zu erwarten, dass ihre Auswirkungen auf die Energieversorgung zunehmen werden und der Anpassungsbedarf sehr wahrscheinlich deutlich steigt.¹ Welche Konsequenzen beispielsweise ein umfassender Blackout in einem Industrieland haben kann, hat sich vor 10 Jahren gezeigt, als es am 14. August 2003 in großen Teilen des Mittleren Westens und Nordostens der USA sowie in der kanadischen Provinz Ontario zu einem Stromausfall kam, von dem schätzungsweise 50 Mio. Menschen betroffen waren und der in einigen Regionen 4 Tage andauerte. Der Blackout hatte zum Ausfall von rund 100 Kraftwerken mit einer Gesamtleistung von knapp 62.000 Megawatt Strom geführt. Die Kosten des Stromausfalls betragen rund 6 Mrd. \$.² Dieser Stromausfall war zwar nicht auf den Klimawandel zurückzuführen, sondern hatte seine Ursache in einer anfangs unentdeckten Störung in einem Generator in Ohio, – die dann durch das Zusammenspiel technischen und menschlichen Versagens eine verheerende Kettenreaktion anstieß – trotzdem zeigt dieses Beispiel, wie wichtig und verletzlich die Energieinfrastruktur ist. Entsprechend wichtig ist es, sie rechtzeitig an den zu erwartenden Klimawandel anzupassen.

Der Klimawandel stellt Unternehmen aber nicht nur vor neue Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt, sondern er birgt auch Chancen, die ergriffen werden können.³ Dieser gesellschaftlichen Herausforderung begegnet die Politik bereits mit einer ganzen Reihe von Maßnahmen, wobei der Fokus in Deutschland noch weitestgehend auf Maßnahmen zur Vermeidung, also der Reduktion des Ausstoßes klimarelevanter Gase, liegt.⁴ Doch auch wenn diese Vermeidungsaktivitäten zu einem Erreichen des 2-Grad-Ziels führen würden, hat bereits eine solche Erwärmung Folgen für alle Bereiche der Gesellschaft.⁵ Daher gewinnen zunehmend Fragestellungen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels an Bedeutung.

Anpassungsmaßnahmen unterscheiden sich von Vermeidungsmaßnahmen in erster Linie dadurch, dass die Vermeidung bzw. Reduktion klimaschädlicher Gase nur im globalen Maßstab erfolgversprechend ist, während Maßnahmen zur Anpassung jeweils den regionalen oder lokalen Gegebenheiten angepasst werden müssen. Dies führt dazu, dass sie deutlich komplexer sind als Aktivitäten zur Treibhausgasvermeidung, was ihre passgenaue Ausgestaltung und Umsetzung ebenfalls erschwert.

Von den möglichen Auswirkungen des Klimawandels wird eine Vielzahl gesellschaftlicher Bereiche betroffen sein und es stellt sich die Frage, wie sie auf die anstehenden Veränderungen vorbereitet werden können. Diesem Prozess der Anpassung wurde seitens der Politik

¹ Vgl. Gößling-Reisemann et al. (2012).

² Vgl. U.S.-Canada Power System Outage Task Force (2004).

³ Für eine umfassende Diskussion des aktuellen Wissensstands zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Handlungsmöglichkeiten von Unternehmen und sich daraus ergebende Chancen und Herausforderungen, sei an dieser Stelle auf das im Herbst 2013 erscheinende Klimanavigator-Dossier „Klimawandel und Wirtschaft“ verwiesen, vgl. www.Klimanavigator.de (2013).

⁴ Vgl. Groth / Wacker (2012), S. 2-4. Für eine umfassende Darstellung und Diskussion dazu siehe auch das Sonderheft 2012 der Zeitschrift „Wirtschaftsdienst – Zeitschrift für Wirtschaftspolitik“.

⁵ Vgl. beispielsweise Carbon Disclosure Project (2012).

mit dem EU-Grünbuch (2007)⁶, der Deutschen Anpassungsstrategie (2008), dem EU-Weißbuch (2009) und dem Deutschen Aktionsplan Anpassung (2011) sowie der EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (2013) ein Rahmen gegeben.

Das wesentliche Ziel der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) ist es, „(...) die Verwundbarkeit gegenüber den Folgen des Klimawandels zu mindern bzw. die Anpassungsfähigkeit natürlicher, gesellschaftlicher und ökonomischer Systeme zu erhalten oder zu steigern und mögliche Chancen zu nutzen.“⁷ Als vordringlichste Aufgabe im Bereich der Anpassung an den Klimawandel und seine Folgen wird stets die Bedeutung und Notwendigkeit der Vergrößerung der Wissensbasis genannt.⁸ Damit ist einerseits die Generierung neuen Wissens adressiert, andererseits kann das bereits vorhandene aber weitestgehend diffus vorliegende Wissen systematisiert werden. Dies trifft insbesondere auf die in der Anpassungsstrategie genannten Gesellschaftsbereiche und Naturräume zu. Auch Betroffene in der Energiebranche selbst weisen darauf hin, dass die Verbreiterung der Wissensbasis eine wichtige Voraussetzung zur Anpassung an den Klimawandel sei.⁹ Dies ist insbesondere deshalb von großer Bedeutung, da Investitionen in Infrastrukturen – Kraftwerke oder Netze – i.d.R. sehr langfristige Entscheidungen darstellen. Kraftwerke oder Netze haben meist Nutzungsdauern von 40 Jahren oder mehr. Selbst durchschnittliche Technologieerneuerungszyklen bei kostenintensiven Bauteilen liegen noch bei rund 30 Jahren.¹⁰

Die Erweiterung der Wissensbasis erfüllt damit eine wichtige Aufgabe im Rahmen der Anpassung. Dabei ist es allerdings nicht nur wichtig, das entsprechende Wissen zu generieren bzw. zu verdichten, das gewonnene Wissen muss auch für die unterschiedlichen Akteursgruppen in spezifisch verwertbare Informationen umgewandelt und verfügbar gemacht werden. Nur so können entsprechende Gegenmaßnahmen geplant und umgesetzt werden.

Infrastrukturen spielen in der Diskussion um den Klimawandel eine besondere Rolle. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass Beeinträchtigungen einer Infrastruktur in der Regel negative Auswirkungen für die gesamte Gesellschaft mit sich bringen und Infrastrukturen andererseits meist sehr kapitalintensiv sind und lange Lebensdauern aufweisen. Unter den Infrastruktursystemen nimmt die Energiewirtschaft noch einmal eine Sonderstellung ein, da eine Unterbrechung der Energieversorgung – unabhängig ob durch Beeinträchtigungen in der Energieerzeugung oder der Energieverteilung – massive Beeinträchtigungen anderer Sektoren der Volkswirtschaft zur Folge hat.¹¹ Zudem reagiert das Energiesystem besonders sensibel auf klimatische Veränderungen, da bspw. das physische und technische Management sowie die wirtschaftliche Optimierung in regionalen und nationalen (künftig auch europäischen) Märkten in vielfältiger Weise von Wetterbedingungen abhängig ist.¹² Zu nennen ist etwa die vorrangige Einspeisung regenerativer Energien in das Stromnetz, die wetterbedingt starken Schwankungen unterliegt. Hinzu kommt die erwähnte Langlebigkeit von Infrastrukturen – heutige Investitionsentscheidungen haben Konsequenzen für die kommenden 40 bis 50 Jahre. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, heutige Anpassungsentscheidungen auf eine breite und fundierte Wissensbasis zu stellen.

⁶ Vgl. Europäische Kommission (2007).

⁷ Bundesregierung (2008).

⁸ Vgl. Bundesregierung (2008), S. 4; Bundesregierung (2011).

⁹ Vgl. Engelhardt (2011).

¹⁰ Vgl. Pechan et al. (2011).

¹¹ Vgl. Scheele / Oberdörffer (2011) sowie die dort angegebenen Quellen. Dabei sind die unmittelbaren Schäden an der Infrastruktur selbst häufig deutlich geringer als die Folgeschäden. Frontier Economics (2008) hat in einer Studie die volkswirtschaftlichen Kosten einer einstündigen Versorgungsunterbrechung im Winter auf 0,6 bis 1,3 Mrd. Euro geschätzt. Wenngleich die Schätzung eine relativ große Spannbreite hat, so wird doch deutlich, welchen Wert eine sichere und unterbrechungsfreie Energieversorgung hat.

¹² Vgl. Dubus / Parey (2012).

2. Der Klimawandel und seine möglichen Folgen

Seit dem Beginn der Industrialisierung wird der natürliche Treibhauseffekt durch menschliche Einflüsse verstärkt. Insbesondere die Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas führt zu einer nachweisbar erhöhten Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre. So kommt beispielsweise das Global Carbon Project in seiner aktuellen Bestandsaufnahme der weltweiten CO₂-Emissionen zu dem Ergebnis, dass der globale CO₂-Ausstoß im Jahr 2011 erneut um 3 % auf 34,7 Mrd. Tonnen Kohlendioxid anstieg. Damit wurde ein historischer Höchststand der CO₂-Emissionen erreicht, die 54 % über denen von 1990 – dem Kyoto-Referenzjahr – liegen.¹³ Insgesamt stellte der 2009 maßgeblich durch die globale Finanzkrise ausgelöste Rückgang der Treibhausgasemissionen um 1,4 % also nur eine kleine Delle mit geringen Auswirkungen auf den langfristigen Trend eines weiter zunehmenden CO₂-Ausstoßes dar. Eine Kehrtwende dieser Entwicklungen ist derzeit ebenso wenig abzusehen, wie deutliche Verbesserungen der Kohlenstoffintensität im Rahmen der weltweiten wirtschaftlichen Aktivitäten.

Eine Folge dieser Entwicklungen ist der Anstieg der globalen Mitteltemperatur. Von 1900 bis heute betrug dieser Anstieg fast 0,8°C.¹⁴ Der globale Klimawandel findet also statt und wird sehr wahrscheinlich vielfältige Folgen nach sich ziehen. Es ist davon auszugehen, dass diese Auswirkungen sowohl eine Reihe von Wirtschaftssektoren und Regionen, als auch nicht auf Märkten gehandelte Güter, wie die menschliche Gesundheit, Ökosysteme oder die Biodiversität betreffen werden.

Um diese zu erwartenden Entwicklungen einzudämmen, wurde im Rahmen internationaler Klimaverhandlungen Einigkeit darüber erzielt, dass sich die Atmosphäre um nicht mehr als 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau erwärmen solle. Um dieses so genannte „2-Grad-Ziel“ erreichen zu können, müssten die weltweiten Treibhausgasemissionen zwischen 2015 und 2020 ihren Gipfel erreicht haben und anschließend schnell abnehmen. Sollten die Emissionen weiterhin so deutlich ansteigen wie bis 2011, wird es sehr unwahrscheinlich sein, das 2-Grad-Ziel noch zu erreichen. Insgesamt muss die Dekarbonisierung der Gesellschaft so weit vorangetrieben werden, dass die durchschnittlichen jährlichen Pro-Kopf-

Emissionen bis zum Jahr 2050 auf weit unter eine Tonne CO₂ reduziert werden. Dieser Wert liegt 80 bis 95 % unter den aktuellen Pro-Kopf-Emissionen der Industriestaaten.¹⁵

Der aktuelle Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) führt den Klimawandel mit einer Wahrscheinlichkeit von über 95 % auf menschliche Aktivitäten zurück. Anzeichen für den Klimawandel sind demnach unter anderem eine steigende globale Durchschnittstemperatur sowohl der Luft als auch der Gewässer; dieser Anstieg zieht dann weitere Auswirkungen nach sich wie beispielsweise einen



¹³ Vgl. Global Carbon Project (2012). Weitere Informationen zum Global Carbon Budget finden sich auf der Homepage des Global Carbon Project.

¹⁴ Vgl. IPCC (2007).

¹⁵ Weitere Hintergrundinformationen und aktuelle Einschätzungen zur Erreichbarkeit des „2-Grad-Ziels“ finden sich auf der Homepage des Climate Action Tracker.

Anstieg des Meeresspiegels, das Abtauen der Polkappen und von Gletschern, gesundheitliche Risiken für den Menschen (hitzebedingte Sterblichkeit, Ausbreitung von Infektionskrankheiten aufgrund der Verbreitung von Überträgern, Ausbreitung von Allergien auslösenden Pollen etc.) oder eine erwartete Zunahme hinsichtlich Stärke und Häufigkeit von Extremwetterereignissen (Stürme und Starkniederschläge).¹⁶

Wie sich die Klimaveränderungen lokal auswirken, ist mit hohen Unsicherheiten verbunden; dies resultiert aus den lokal sehr unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten sowie der Prognosegenauigkeit, die einerseits mit zunehmendem Zeithorizont steigt und andererseits bei höherer geographischer Auflösung abnimmt. Exakte Klimaprojektionen, z. B. auf Landkreisebene, sind für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen relevant, im Rahmen dieser Synthese sind allerdings die grundsätzlichen Entwicklungstrends ausreichend.

Dabei sind die globalen Entwicklungstrends grundsätzlich auch in Deutschland feststellbar; in Abhängigkeit des genutzten Klimamodells und den zugrunde gelegten Annahmen über die Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen ergeben sich hier zwar unterschiedliche Ergebnisse,¹⁷ dennoch ist der Trend aller Projektionen eindeutig: es wird insgesamt wärmer, die Sommermonate werden trockener und die Wintermonate feuchter, wobei die Gesamtniederschlagsmenge im Jahresmittel aber weitestgehend konstant bleibt. Für Windgeschwindigkeiten ist bisher kein Trend erkennbar. Konkret zeigen Klimamodelle für Deutschland einen Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur für den Zeitraum „2021–2050“ von rund 1,0 bis 2,0°C und für den Zeitraum „2071–2100“ von ungefähr 2,2 bis 4,0°C gegenüber dem Wert der Referenzperiode „1961–1990“. Die Erwärmung wird dabei im Süden und im Osten Deutschlands stärker ausfallen als im Norden und im Westen. Die regionalen Unterschiede werden im Zuge dessen zunehmen; wobei insgesamt häufigere Hitzeperioden mit geringerer Abkühlung in der Nacht erwartet werden.¹⁸

Neben diesen langfristigen Entwicklungstrends sind auch extreme Wetterereignisse¹⁹ sowie eine größere Klimavariabilität zu berücksichtigen. Insbesondere die Projektion von Extremwetterereignissen – wo treten diese mit welcher Häufigkeit und welcher Intensität auf – ist einerseits aufgrund ihrer Singularität im Vergleich zur Projektion langfristiger klimatischer Veränderungen schwierig, andererseits aber auch wichtig, da von Extremwetterereignissen häufig hohe Schadenspotenziale ausgehen.²⁰

Die zu erwartenden klimabedingten Veränderungen, die mittelbare oder unmittelbare Auswirkungen auf den Energiesektor mit sich bringen werden, sind:²¹

- häufigere und intensivere Hitzeperioden,
- häufigere Trocken- und Dürreperioden mit Auswirkungen auf den Wasserhaushalt,
- häufigere Wetterextreme, wie z. B. Starkregen, Sturmböen, Hagel, Blitzschlag,
- steigende Wassertemperaturen und
- steigendes Hochwasserrisiko in den Frühlingsmonaten.

¹⁶ Vgl. IPCC (2013).

¹⁷ Vgl. Bundesregierung (2008) und Mahammadzadeh et al. (2013).

¹⁸ Für anschauliche Informationen zu möglichen Klimaänderungen in Deutschland siehe exemplarisch Jacob et al. (2012), Bundesregierung (2011), die regionalen Klimaatlantanten für Deutschland der Regionalen Klimabüros oder den Deutschen Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes; für weitere Informationen ebenfalls Fischer-Bruns (2011).

¹⁹ Vgl. Schönwiese et al. (2005).

²⁰ Vgl. Mahammadzadeh et al. (2013).

²¹ Vgl. exemplarisch Hirschl / Dunkelberg (2009).

Diese hier nur kurz angerissenen Folgen des Klimawandels – die ausführliche Darstellung erfolgt im Hauptteil der Synthese – zeigt bereits die Notwendigkeit, den Energiesektor auf die zu erwartenden Veränderungen vorzubereiten und anzupassen.

Für Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft ist es jedoch schwer, einzuschätzen, wann mit wesentlichen Folgen des Klimawandels zu rechnen ist. Wie im weiteren Verlauf der Synthese deutlich werden wird, sind insbesondere Extremwetterereignisse im Hinblick auf ihr Gefahrenpotenzial für die kritische Infrastruktur im Energiesektor relevant. Dabei ist vor allem fraglich, ob heutige Extremwetterereignisse bereits als Auswirkungen des Klimawandels betrachtet werden können, und wie ihr zukünftiges Auftreten einzuschätzen ist. Hierzu kann der IPCC-Sonderbericht „Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel (SREX)“²² eine gute erste Einschätzung abgeben. Darin wurde der aktuelle Stand des weltweiten Wissens zu Änderungen von Wetter- und Klimaextremen zusammengetragen, wobei jedoch keine spezifische Analyse für Deutschland durchgeführt wurde.

Insgesamt zeigt sich, dass aufgrund ihres bislang seltenen Auftretens die Datengrundlage zu Extremwetterereignissen noch überaus dürftig ist. Grundsätzlich wird in der Studie betont, dass Extremwetterereignisse Bestandteil der natürlichen Klimavariabilität sind, wobei der Klimawandel sehr wahrscheinlich schon zu Veränderungen der Intensität, Länge, Häufigkeit oder räumlichen Ausdehnung von einigen Extremen wie beispielsweise Hitzewellen, Starkregenereignissen oder schweren Hochwasserereignissen in Küstenregionen geführt hat. Für die Zukunft sind verstärkt Änderungen der Extremwetterereignisse zu erwarten, deren Ausmaß vom menschlich beeinflussten Teil des Klimawandels abhängt. Zudem ist nicht auszuschließen, dass es auch zu bislang noch nicht bekannten Ausprägungen von Extremwetterereignissen kommen kann. Basierend auf den zum Zeitpunkt der Studie aktuellen Klimamodellen dürften erst um die Jahrhundertmitte herum stärkere Veränderungen zu erwarten sein. Bis zum Ende des Jahrhunderts sind demzufolge eine deutliche Erhöhung der extremen Temperaturen und längere Hitzewellen, eine Zunahme von Starkniederschlägen in vielen Regionen der Erde sowie eine Zunahme der Intensität tropischer Wirbelstürme ebenso wahrscheinlich, wie extremere Küstenhochwasser in Folge eines steigenden Meeresspiegels.

Um Aussagen über die Wahrscheinlichkeit von Extremereignissen machen zu können, sind insgesamt umfangreiche Analysen der Klimaprojektionsdaten vorzunehmen. Zudem können die Ergebnisse regional sehr unterschiedlich sein und es kommt darauf an, welche Zeiträume betrachtet werden. Hierzu kann für weitere Informationen beispielsweise auch auf eine Studie von Deutschländer und Dalelane verwiesen werden. Daraus ergibt sich, dass es ab 2050 zu einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit von heute noch relativ seltenen Ereignissen wie sehr hohen täglichen Niederschlagsmengen und Spitzenwindgeschwindigkeiten kommen könnte. Für den Winter ist laut dieser Studie des Deutschen Wetterdienstes besonders im Norden Deutschlands mit einer Zunahme des Auftretens seltener Niederschlagsereignisse (Starkregen) zu rechnen.²³

²² Vgl. IPCC (2012).

²³ Vgl. Deutschländer / Dalelane (2012).

3. Der Energiesektor

3.1 Struktur des Energiesektors

Der Energiesektor umfasst alle Unternehmen der Energiebranche, die Energie aus unterschiedlichen Ressourcen erzeugen und diese über Übertragungs- und Verteilnetze sowie Rohrleitungen den Abnehmern – dies können Privathaushalte, Unternehmen oder öffentliche Institutionen sein – zur Verfügung stellen.

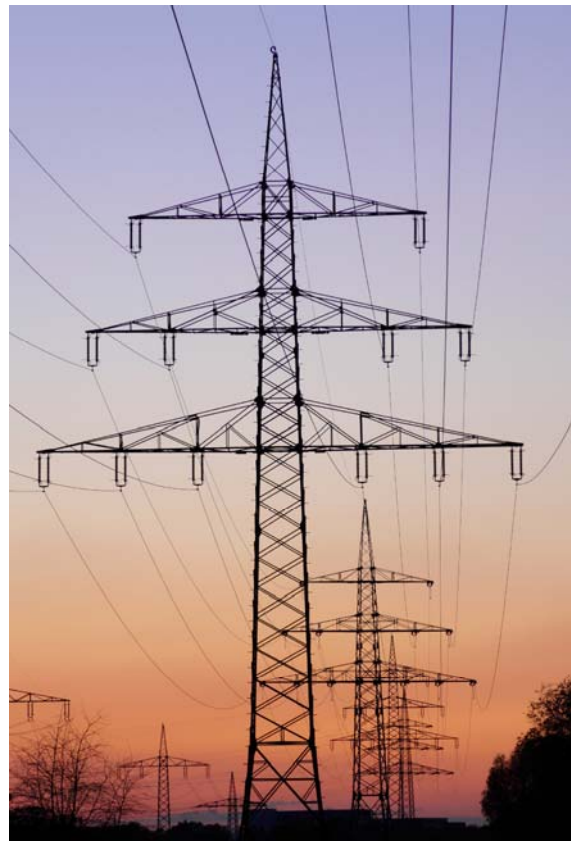
Energie wird aus unterschiedlichen konventionellen und regenerativen Energieträgern gewonnen. Zu den konventionellen Energieträgern zählen Kohle, Gas, Öl und die Kernenergie; zu den regenerativen Energien Windkraft, Sonnenenergie, Wasserkraft, Geothermie und Biomasse.

Historisch bedingt ist die Energieerzeugung in Deutschland zentralistisch geprägt. Die Erzeugung erfolgt also vor allem zentral in Großkraftwerken, die sich zumeist in Verbrauchernähe im Süden und Westen Deutschlands befinden. Die Auswahl der Standorte wurde allerdings nicht ausschließlich von der Nähe zu den Verbrauchern determiniert, es muss ebenfalls gewährleistet sein, dass beispielsweise Kohlekraftwerke logistisch gut erreichbar sind, um die Versorgung mit Kohle gewährleisten zu können. Ebenfalls sind die Kraftwerke auf die Verfügbarkeit von Wasser zur Kühlung angewiesen. Aus diesen Gründen finden sich die Großkraftwerke in der Regel an Flüssen – so ist die Erreichbarkeit per Schiff und die Verfügbarkeit von Kühlwasser gegeben. Seit einigen Jahren ist allerdings der Umbau des deutschen Energiemarktes in Richtung stärker dezentraler und kleinerer Erzeugungseinheiten im Norden und Nordosten feststellbar. Neben der Umstrukturierung der Erzeugungsstandorte ist zudem eine Verschiebung im Energiemix zu verzeichnen.

Die erzeugte Energie wird anschließend durch Übertragungs- und Verteilnetze zu den Verbrauchern transportiert. Das gesamte deutsche Stromnetz umfasst ca. 1,7 Mio. Kilometer Stromleitungen; die Übertragungsnetze (Höchst- und Hochspannungsnetze) umfassen ca. 110.000 Kilometer. Dies ist deshalb hervorzuheben, da der Anteil unterirdisch verlegter Kabel mit 71 % (2003) insgesamt zwar hoch ist, die Hoch- und Höchstspannungsnetze bisher aber kaum unterirdisch verlegt sind. Vor dem Hintergrund der Bedeutung dieser Netze für die Versorgungssicherheit und Netzstabilität einerseits sowie zunehmender Extremwetterereignisse andererseits, sind diese Netze damit aber möglicherweise besonders anfällig für Beschädigungen, was zu hohen volkswirtschaftlichen Kosten führen kann.

Neben den Erzeugungs- und Verteilkapazitäten als zweitem und drittem Glied in der Wertschöpfungskette ist der Blick zusätzlich auf die erste Stufe der Wertschöpfungskette – die Gewinnung bzw. Verfügbarkeit der Rohstoffe – zu richten; dies umfasst nicht nur die Gewinnung von Kohle, Öl oder Gas, sondern für den Bereich der regenerativen Energien auch die Sonneneinstrahlung, das Windangebot oder die Verfügbarkeit von Biomasse.

Ebenso wie die Gewinnung oder auch die Verteilung als erste Stufen der Wertschöpfungskette



te berücksichtigt werden müssen, so wird die Wertschöpfungskette durch die Abnehmer geschlossen. Aufgrund klimatischer Veränderungen wird sich das Nachfrageverhalten verändern, was eine Anpassungsreaktion seitens der Energieerzeuger notwendig machen wird. Die beschriebene Wertschöpfungskette operiert dabei eingebettet in einen politischen Ordnungsrahmen, der sich künftig ebenfalls verändern wird.

Da in der vorliegenden Synthese die Zusammenstellung der physischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft im Mittelpunkt steht, werden die sich ändernde Energienachfrage und der politische Rahmen hier nicht betrachtet.

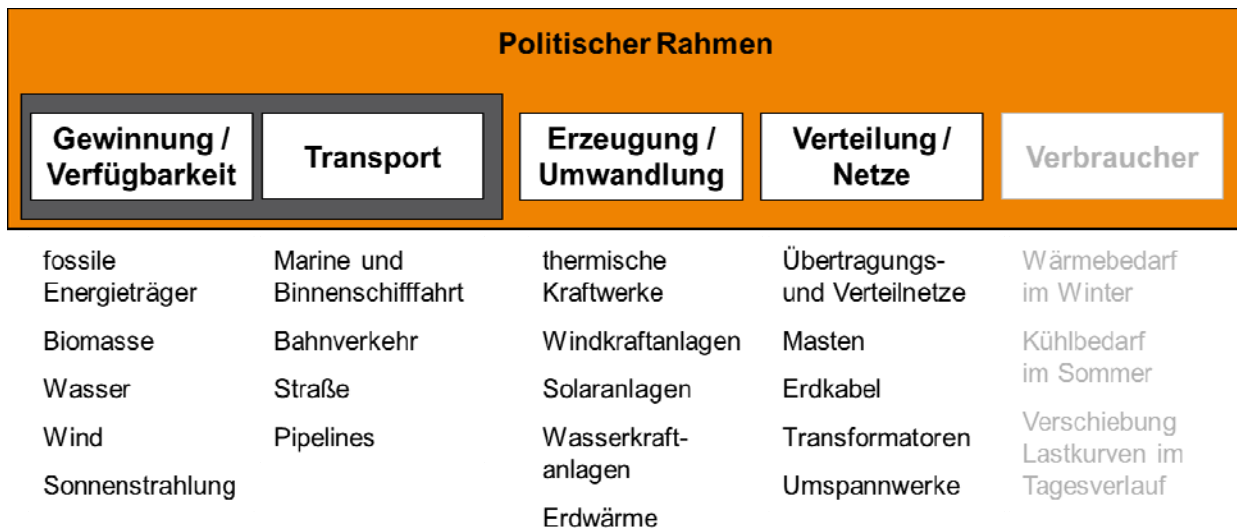


Abbildung 1: Wertschöpfungskette Energiesektor

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Dunkelberg et al. (2009), S. 2.

Interessante Einblicke zur spezifischen Lage der Energieversorgungsbranche im Hinblick auf aktuelle und zukünftige Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken unabhängig von Einflüssen des Klimawandels, liefert eine SWOT-Analyse im Rahmen des aktuellen „Statista-Branchenreports Energieversorgung“.²⁴

Als Stärke wird dort beispielsweise ein derzeit relativ ausgewogener Energiemix mit einem breiten und vielseitigen Energieportfolio aufgeführt, der die Anfälligkeit gegenüber Rohstoffpreisschwankungen reduziert. Zudem sorgen insbesondere im Bereich der Windkraft eine hohe Expertise und Reputation in Forschung und Entwicklung für eine hohe internationale Wettbewerbsfähigkeit.

Demgegenüber zeigen sich Schwächen durch eine große Importabhängigkeit im Bereich der Primärenergieträger, was sich aus der Knappheit natürlicher Ressourcen im Inland ergibt und hier im Bereich der fossilen Energieträger wiederum eine spezifische Abhängigkeit von volatilen Rohstoffpreisen mit sich bringt. Ebenfalls als Schwächen werden eine Stagnation des inländischen Energieverbrauchs sowie eingeschränkte Handlungsmöglichkeiten durch Marktregulierungen und Planungsunsicherheiten beispielsweise durch rechtliche Rahmenbedingungen wie den Atomausstieg oder Emissionsgrenzen angesehen.

Im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen liegt eine große Chance zweifelsohne im Wachstumsmarkt für erneuerbare Energien, wobei die Marktposition von Produzenten erneuerbarer

²⁴ Vgl. Eden et al. (2013).

Energien zusätzlich durch den Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie und weitere Rahmenbedingungen begünstigt wird. Darüber hinaus ist abzusehen, dass staatlicherseits bspw. bis 2014 rund 3,5 Mrd. Euro für Forschung und Entwicklung von Technologien in erneuerbare Energien investiert werden.

Als perspektivische Risiken ergeben sich vor allem Planungsunsicherheiten durch als unklar angesehene politische Rahmenbedingungen aber auch eine unzulängliche und per se in vielen Bereichen zu ertüchtigende Infrastruktur, wobei zudem ein kostenintensiver Aus- und Umbau der Netzinfrasturktur auch zur zunehmenden Einspeisung alternativer Energien genannt wird.

3.2 Zukünftige Entwicklungen

Auch über die möglichen Einflüsse des Klimawandels hinaus, wird die Energiewirtschaft in Deutschland zukünftig durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Dazu gehören auf internationaler Ebene das globale Energieangebot, die Verfügbarkeit und die Reserven an Rohstoffen, die politischen Rahmenbedingungen in den Förderregionen und nicht zuletzt die verfügbaren Transport- und Umwandlungskapazitäten für die Rohstoffe. Aber auch der globale Energiebedarf sowie die Preisentwicklung auf den Weltmärkten haben einen Einfluss – beispielsweise auf die Energiepreise. Als nationale Einflussfaktoren sind vor allem die Bevölkerungsentwicklung, die Anzahl der Haushalte, die konjunkturelle Entwicklung, der Strukturwandel in der Wirtschaft sowie technologische Entwicklungen zu nennen. Hinzu kommen institutionelle, rechtliche und politische Rahmenbedingungen, die als Eckpfeiler der künftigen Energie- und Klimapolitik fungieren.²⁵

Dabei steht derzeit natürlich vor allem die Energiewende im Fokus, weshalb wir uns darauf beschränken werden, einige der wesentlichen energiepolitischen Ziele sowie die sich daraus ergebenden Herausforderungen zu skizzieren. Der aktuelle Zielkorridor der Energiewende ergibt sich aus den Beschlüssen zum „Eckpunktepapier zur Energiewende“, welches die Umsetzung der Maßnahmen des Energiekonzepts vom September 2010 beschleunigen soll.²⁶ Daraus ergeben sich bis 2050 die wichtigsten Ziele der deutschen Energie- und Klimapolitik:

- Reduktion des Treibhausgasausstoßes (gegenüber 1990) bis 2020 um 40 % bis 2030 um 55 %, bis 2040 um 70 % und bis 2050 um 80 bis 95 %
- Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 20 % bis 2020 und um 50 % bis 2050
- Steigerung der Energieproduktivität um 2,1 % pro Jahr, bezogen auf den Endenergieverbrauch
- Verringerung des Stromverbrauchs (gegenüber 2008) um 10 % bis 2020 und um 25 % bis 2050
- Ausbau der erneuerbaren Energien, so dass sie bis 2020 einen Anteil von 18 %, bis 2030 von 30 %, bis 2040 von 45 % und bis 2050 von 60 % am Bruttoendenergieverbrauch haben
- Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bis 2020 auf 35 %, bis 2030 auf 50 %, bis 2040 auf 65 % und bis 2050 auf 80 %
- Umsetzung eines schrittweisen Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie bis 2022

²⁵ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013).

²⁶ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011).



Die aktuellen Zahlen zum Ausbau der erneuerbaren Energien verdeutlichen bereits eine große Dynamik, denn im vergangenen Jahr lag ihr Anteil am Bruttostromverbrauch in Deutschland bei 22,9 %. Dies ist gegenüber 2011 ein Anstieg von fast 2,5 %. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen betrug 2012 gut 136 Mrd. kWh und lag damit 10 % über dem Niveau des Vorjahres. Zu diesem sich stetig fortsetzenden Anstieg haben im letzten Jahr vor allem die stark gestiegene Stromerzeugung aus Photovoltaik aber auch der Zuwachs bei Biogas und Wasserkraft beigetragen.²⁷

Vor dem Hintergrund, dass es sich bei der Energieinfrastruktur um eine „kritische Infrastruktur“ handelt, die in Folge des Klimawandels in den kommenden Jahrzehnten mit neuen Anforderungen konfrontiert sein wird, werden abschließend exemplarisch Notwendigkeiten des Netzausbaus und der Entwicklung von Speichertechnologien skizziert.

Der zur Erreichung der Energiewende erforderliche Netzausbau ist mittlerweile in der breiten öffentlichen Diskussion angekommen. Die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber (50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW) haben am 17. Juli 2013 ihren zweiten Entwurf des aktuellen Netzentwicklungsplans (NEP) an die Bundesnetzagentur übergeben. Das Ziel des „Netzentwicklungsplans Strom 2013“ ist es, unter Berücksichtigung der Integration erneuerbarer Energien und der Entwicklung eines europäischen Strommarktes den Ausbaubedarf zum Erhalt eines stabilen Netzbetriebes bis zum Jahr 2023 zu bestimmen.²⁸ Den Schwerpunkt bilden dabei leistungsstarke Nord-Süd-Verbindungen. Gemäß dem NEP sind insgesamt Netzverstärkungen und -optimierungen in vorhandenen Trassen auf einer Länge von rund 4.900 km notwendig, wovon ungefähr 3.400 km auf die Erneuerung bestehender Trassen entfallen. Die Neubauerfordernisse umfassen ca. 1.500 km Drehstromleitungstrassen und rund 2.100 km Korridore für Hochspannungsgleichstromleitungen. Die vier Gleichstrom-Übertragungskorridore in Nord-Süd-Richtung haben hierbei eine Übertragungskapazität von insgesamt 12 GW. Eine Umstellung von Wechselstrom- auf Gleichstrom-Betrieb ist auf einer Länge von rund 300 km vorgesehen. Der NEP 2013 zeigt also den Übertragungsbedarf zwischen Anfangs- und Endpunkten auf, wobei Anfangspunkte üblicherweise dort sind, wo es einen Überschuss erzeugter Energie gibt und Endpunkte demgegenüber beispielsweise Regionen sind, die durch einen hohen Verbrauch charakterisiert sind und / oder von den beschlossenen Stilllegungen von Kernkraftwerken bis zum Jahr 2022 betroffen sind. So müssen die südlichen Bundesländer im Jahr 2023 ungefähr 30% ihres Jahresverbrauchs importieren. Zu berücksichtigen ist bei diesen Aussagen jedoch, dass dort keine Trassenverläufe skizziert oder vorgeschlagen werden, sondern es ausschließliches Ziel ist, den als notwendig erachteten Bedarf an neuen Leitungen zwischen bestimmten Netzknoten zu ermitteln. Konkrete Trassenkorridore werden erst in der Bundesfachplanung durch die Bundesnetzagentur bzw. in der Raumordnung durch die Bundesländer festgelegt. Auch finden sich im NEP 2013 keinerlei Aussagen oder Vorschläge zu Stand-

²⁷ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013). Es ist anzumerken, dass es sich hierbei um vorläufige Daten handelt. Ferner ist anzumerken, dass es trotz einer Zunahme der installierten Leistung bei der Stromerzeugung aus Windkraft 2012 verglichen mit 2011 zu einem Rückgang gekommen ist, was insbesondere mit schlechteren Windverhältnissen zu erklären ist.

²⁸ Vgl. Feix et al. (2013). Weitere umfassende Informationen und Dokumente zum Netzausbau finden sich auf den Internetpräsenzen der Bundesnetzagentur.

orten für zukünftige fossile Kraftwerke, Anlagen erneuerbarer Energien oder gar zu einem künftigen Strommarktdesign.

Neben dem Netzausbau ist jedoch zwingend auch die Entwicklung und Nutzbarmachung von Stromspeichern notwendig.²⁹ Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, unterschiedlichste Speichertechnologien zu nutzen, wie beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicherkraftwerke, Schwunghmassespeicher, Kondensatoren, supraleitende Spulen, Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren sowie weitere Formen von Batterien und Wasserstoffspeichern.³⁰

Die besten technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten bieten derzeit Pumpspeicher. Sie sind jedoch nur für den Ausgleich von Tageslasten einzusetzen. Zudem könnten Pumpspeicherkraftwerke aufgrund der spezifischen geographischen Bedingungen in Deutschland sehr wahrscheinlich nur regional begrenzt zum Einsatz kommen und ihr Neubau ist in der Regel mit erheblichen Eingriffen in die Umwelt verbunden. Ein großes Potenzial ist beispielsweise auch für Druckluftspeicherkraftwerke zu konstatieren. Die hierfür notwendigen unterirdischen Kavernen stehen jedoch nur im Norden und Nordwesten Deutschlands zur Verfügung.³¹ Zur Deckung der Sekundenreserve sowie für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung müsste auf Akkumulatoren, supraleitende magnetische Energiespeicher, elektrochemische Kondensatoren oder Schwungräder zurückgegriffen werden.³²

Eine Förderung von Stromspeichern sollte insgesamt differenzierte ökonomische Anreize setzen, um eine intelligente und wirtschaftliche Kombination zentraler und dezentraler Speicher – konzeptionell abgestimmt auf den Ausbau der Netzinfrastruktur – zu erreichen.³³ Zudem werden verstärkt auch kleinere Speicher wie Batteriespeicher in Elektroautos notwendig. Ebenso sollten neue Wege beschritten und bislang vielleicht noch exotisch anmutende Ideen, wie die Nutzung der Bundeswasserstraßen als dezentrale Pumpspeicher im Rahmen regionaler virtueller Kraftwerke, weiter erprobt werden. Auch könnte das Gasnetz als Speicher erschlossen werden.³⁴ Ein erster Schritt zur Markt- und Technologieentwicklung von Batteriespeichersystemen ist beispielsweise das KfW-Programm „Erneuerbare Energien – Speicher“. Seit dem 1. Mai 2013 wird damit durch zinsgünstige Darlehen der KfW und durch Tilgungszuschüsse, die vom BMU finanziert werden, die Nutzung stationärer Batteriespeichersysteme in Verbindung mit einer an das Netz angeschlossenen Photovoltaikanlage unterstützt.³⁵

²⁹ Vgl. Leprich et al. (2012).

³⁰ Vgl. Hollinger et al. (2013) und Fuchs et al. (2012).

³⁰ Vgl. Groth, M. (2012). Für weitere umfangreiche Informationen zur Energiespeicherung siehe u. a. auch Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE).

³¹ Vgl. Pehnt / Höpfner (2009).

³² Vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2011).

³³ Vgl. Groth (2012b).

³⁴ Vgl. Groth (2012a).

³⁵ KfW Bankengruppe (2013).

4. Bisherige Aktivitäten

In den vergangenen Jahren wurden bereits verschiedene Aktivitäten unternommen, die sich mit der Frage der Verletzlichkeit und den Anpassungserfordernissen des Energiesektors befassen. Hierbei handelt es sich zum Teil um Initiativen auf internationaler Ebene, die eine eher großskalige Betrachtung vornehmen. Es gibt aber auch einige Initiativen, die sich speziell mit der Betroffenheit des deutschen Energiesektors beschäftigt haben. Die Erkenntnisse aus den bisherigen Aktivitäten werden im Teil B der Studie zusammengeführt. Um die verwendeten Quellen einordnen zu können, werden die zentralen bisherigen Aktivitäten nachfolgend kurz vorgestellt.

Im August 2008 fand am heutigen Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ Leipzig das **DAS Symposium**³⁶ statt. Im Rahmen der 2-tägigen Veranstaltung wurde der in der nationalen Klimaanpassungsstrategie anzusprechende Forschungsbedarf für die Klimafolgen- und Klimaanpassungsforschung aus der Sicht der Teilnehmer identifiziert und priorisiert. An dem Symposium haben mehr als 230 geladene Teilnehmer aus Wissenschaft, Verwaltung (Bundes- und Landesministerien sowie den Fachbehörden), Wirtschaft und Verbänden teilgenommen. Auf diese Weise konnten verschiedene Perspektiven und Expertisen berücksichtigt werden. Dabei standen nicht nur sektorale Betroffenheiten beziehungsweise Klimaanpassungsnotwendigkeiten auf der Agenda, es ging auch ganz wesentlich darum, Querschnittsthemen zu identifizieren und zu diskutieren. Die Ergebnisse des Symposiums sind im weiteren Verlauf des Jahres 2008 maßgeblich in die Ausarbeitung der Deutschen Anpassungsstrategie und später in den Aktionsplan Anpassung (2011) eingeflossen.

2009 hat auf internationaler Ebene das im Jahr 2000 gegründete **Carbon Disclosure Project (CDP)**³⁷ eine Umfrage unter 207 Unternehmen der Energiebranche zu den Risiken und Chancen des Klimawandels durchgeführt. 82 % der Unternehmen gaben darin an, dass durch den Klimawandel physische Beeinträchtigungen für den operativen Teil zu erwarten seien, 56 % gaben aber auch an, dass mit dem Klimawandel auch Chancen verbunden seien. Die in diesem Bericht gewählte Systematik orientiert sich nicht an der Wertschöpfungskette im Energiesektor, wie die meisten anderen Berichte; hier werden die möglichen Auswirkungen zu fünf Hauptgruppen zusammengefasst, die die Wertschöpfungskette nur bedingt wiedergeben.³⁸

Im Sommer des Jahres 2009 hat das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung eine Veranstaltungsreihe **Stakeholder-Dialog zur Klimaanpassung** mit verschiedenen Schwerpunkten initiiert, einer dieser Dialoge wurde mit dem Schwerpunkt Energiewirtschaft durchgeführt.³⁹ An dem Dialog waren insgesamt 25 Vertreter aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft sowie von Umweltorganisationen beteiligt. Im Rahmen der eintägigen Veranstaltung wurden aus dem kompletten Spektrum der Energiewirtschaft zuvor als besonders relevant identifizierte Themen im Expertenkreis besprochen. Daher standen Fragen der Elektrizitätserzeugung aus fossilen Energieträgern und Wind sowie die Elektrizitätsverteilung im Mittelpunkt. Der Dialog basierte auf der Methode Weltcafé, einer fokussierten Diskussionsform in wechselnden Kleingruppen. Die Ergebnisse des Dialogs sollten mit Hilfe der verschiedenen beteiligten Akteure insbesondere in den Aktionsplan Anpassung eingebracht werden.

³⁶ Vgl. Umweltforschungszentrum (2008).

³⁷ Das Carbon Disclosure Project ist eine internationale Non-Profit-Organisation, die im Jahr 2000 in London gegründet wurde. Seitdem stellte sie in einer Vielzahl von Studien Ergebnisse standardisierter Umfragen unter Unternehmen und Städten zu Klimarisiken, Reduktionszielen etc. zur Verfügung. Vgl. Carbon Disclosure Project (2013).

³⁸ Vgl. Finley / Schuchard (2009).

³⁹ Vgl. Dunkelberg et al. (2009).

Ende 2009 wurde die **Forschungsgruppe Chamäleon**⁴⁰ etabliert, die zunächst bis Ende 2013 befristet ist. Der Schwerpunkt des interdisziplinären Forschungsprojektes liegt auf der Analyse der Anpassungserfordernisse an die Folgen des Klimawandels für Unternehmen der öffentlichen Versorgung; im Mittelpunkt des Projektes stehen Unternehmen aus den Bereichen Energie und Verkehr. Zur Bearbeitung der aufgeworfenen Fragestellungen wurde ein Dialog mit den beteiligten Praxispartnern initiiert und zunächst der Frage nachgegangen, inwieweit bei den Unternehmen bereits ein Problembewusstsein vorliegt bzw. vorgelegen hat und ob bereits erste Maßnahmen zur Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels ergriffen wurden. In einer bundesweiten Befragung von Unternehmen des Energie- und Verkehrssektors wurde diese Frage einem breiteren Publikum eröffnet. Die Ergebnisse der Befragung wurden abschließend im Rahmen von zwei Branchenworkshops diskutiert.

Im Jahr 2008 wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung das Projekt **KLIMZUG – Klimawandel in den Regionen**⁴¹ initiiert (gefördert bis 2014). In sieben Modellregionen sollen Möglichkeiten zur Steigerung der regionalen Anpassungskompetenzen und die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit auch unter Klimawandelaspekten entwickelt werden. In einigen dieser Modellregionen spielt die Energiewirtschaft mit unterschiedlichen Schwerpunkten eine prominente Rolle – insbesondere in den Teilprojekten **nordwest2050**, **dynaklim**, **KLIMZUG-Nordhessen** und **RADOST**. Zur Abstimmung der Aktivitäten fand Ende 2011 ein die Teilprojekte übergreifendes Arbeitstreffen zwischen Vertretern aus Wissenschaft und Praxis statt.

Vom **Institut der deutschen Wirtschaft** in Köln wurde im Jahr 2013 die wohl jüngste Untersuchung zur Betroffenheit des deutschen Energiesektors durch den Klimawandel durchgeführt. Im Rahmen von 14 Experteninterviews wurden die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Prozessstufen Gewinnung und Verfügbarkeit, Umwandlung/Erzeugung sowie Verteilung ermittelt.⁴² Hier findet sich, das bis dato vorhandene Wissen ergänzend, eine zusätzliche Detaillierung hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Energieträger. So werden beispielsweise die verschiedenen konventionellen Energieträger Öl, Gas, Braun- und Steinkohle unterschieden.

Die hier vorgestellten Initiativen überschneiden sich inhaltlich zum Teil, teilweise werden aber auch komplementäre Blickwinkel eingenommen. Daher ist es zur Erarbeitung einer breiteren Wissensbasis im Sinne der Deutschen Anpassungsstrategie zielführend, die Ergebnisse der bisherigen Aktivitäten systematisch aufzuarbeiten.



⁴⁰ Vgl. Forschungsgruppe Chamäleon (2013).

⁴¹ Vgl. KLIMZUG (2013).

⁴² Vgl. Bardt et al. (2013).

Teil B

Vulnerabilität des Energiesektors

Der Energiesektor ist hinsichtlich der Anpassung an den Klimawandel grundsätzlich in dreierlei Hinsicht betroffen.⁴³ Dies umfasst

- die ersten drei Stufen der Wertschöpfungskette, also die Gewinnung bzw. Verfügbarkeit der Rohstoffe, die Energieerzeugung selbst sowie die Verteilung über die Netze,
- die letzte Stufe der Wertschöpfungskette, also ein sich möglicherweise änderndes Nachfrageverhalten der Abnehmer
- sowie sich auch weiterhin ändernde politische Rahmenbedingungen, wie Energie- und Klimaschutzgesetze.

Im Mittelpunkt der hier betrachteten Aktivitäten stehen die physischen Auswirkungen des Klimawandels, daher wird nachfolgend für die ersten drei Wertschöpfungsstufen entsprechend Abb. 1 – Gewinnung / Verfügbarkeit / Transport, Erzeugung / Umwandlung sowie Verteilung / Netze – der Wissensstand hinsichtlich der Verletzbarkeit des Energiesystems durch den Klimawandel aufgearbeitet. Mögliche Anpassungsnotwendigkeiten aufgrund sich ändernder Konsummuster oder Betroffenheiten durch politische Maßgaben bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt.⁴⁴

Bei der Sichtung der zur Verfügung stehenden Quellen hat sich gezeigt, dass einige der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiesektor wiederholt genannt werden, andere werden nur vereinzelt oder einmalig angesprochen, wieder andere werden gänzlich unterschiedlich eingeschätzt. Dies verdeutlicht, dass bezüglich der Betroffenheit noch weiterer Diskussions- und Klärungsbedarf besteht. Die Planung von Anpassungsmaßnahmen scheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt und vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden Kenntnisse nur in den Fällen sinnvoll, die offenkundig von der breiten Mehrheit als akzeptiert angesehen werden. In den anderen Fällen ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

5. Energiegewinnung und -verfügbarkeit

Auf der ersten Wertschöpfungsstufe wird die Verletzlichkeit des Energiesektors hinsichtlich der Gewinnung und Verfügbarkeit der „Rohstoffe“ betrachtet. Dies schließt einerseits die Gewinnung konventioneller Energieträger wie Kohle, Gas oder Uran und andererseits die Verfügbarkeit der regenerativen Energieträger Sonne, Wind, Wasser oder Biomasse ein. Ebenfalls unter dem Terminus Verfügbarkeit wird hier das Verfügbarmachen der Energieträger in den Kraftwerken verstanden, also beispielsweise der Transport von Kohle zu einem Kraftwerk via Schiff, Bahn oder Lkw.

5.1 Konventionelle Energieträger

Hinsichtlich der Betroffenheit der **Gewinnung** konventioneller Energieträger finden sich durchaus unterschiedliche Einschätzungen; z. T. können durch den Klimawandel die potenziellen Chancen die zu erwartenden Risiken übersteigen.⁴⁵ Eine größere Betroffenheit wird für den Transport der Rohstoffe erwartet.

⁴³ Vgl. Bundesregierung (2008).

⁴⁴ Vgl. Kuckhinrichs et al. (2008).

⁴⁵ Vgl. Bardt et al. (2013); ähnlich auch Engelhardt (2011).

Bei der Gewinnung von **Öl** und **Gas** muss zunächst grundsätzlich zwischen der on- und off-shore Förderung unterschieden werden. Während für die on-shore-Förderung keine nennenswerten Beeinträchtigungen identifiziert werden konnten, wird hinsichtlich der off-shore-Förderung der Meeresspiegelanstieg als mögliche Gefahr erwähnt,⁴⁶ dem aber technisch durch eine Anhebung der Plattformen begegnet werden könne. Neben Beeinträchtigungen durch den Meeresspiegelanstieg können Schwierigkeiten bei der off-shore Förderung von Öl und Gas durch die Zunahme von Extremwetterereignissen entstehen.⁴⁷ Neben diesen durchgehend als gering eingeschätzten Bedrohungen wurde die bessere Zugänglichkeit durch das Abtauen der Polkappen zu bisher nicht zu erschließenden Quellen – u. a. auch Methanhydrat⁴⁸ – als eine Chance wahrgenommen.⁴⁹

Der Abbau von **Braunkohle** (ausschließlich) und **Uran** (überwiegend) erfolgt in Tagebauen. In der jüngsten Studie von Bardt et al.⁵⁰ wird erstmals eine potenzielle Beeinträchtigung der Anwohner von Braunkohletagebauen aufgrund verstärkter Staubentwicklung nach langer Trockenheit erwähnt. Um der Staubentwicklung entgegenzuwirken, würde die Braunkohle befeuchtet. Wie allerdings die Wasserverfügbarkeit bei längerer Trockenheit eingestuft wird, wird in der Studie nicht erwähnt. Eine Beeinträchtigung des Abbaus der Braunkohle selbst wird ebenfalls nicht erwähnt. Frühere Quellen verweisen allerdings auf mögliche Auswirkungen auf die Wasserhaltung bei Braunkohletagebauen aufgrund von Wetterextremen.⁵¹ Dies ist eine wichtige Frage, da die Braunkohlkraftwerke zumeist über das abgepumpte und sonst in den Tagebau nachsickernde Grundwasser gekühlt werden. Hier könnte folglich eine Nutzungskonkurrenz bei ohnehin reduziertem Wasserdargebot entstehen. Führt lange Trockenheit zu keiner Beeinträchtigung der Förderung, so können Starkregenereignisse zu Abrutschungen im Tagebau führen. In jedem Fall können die Förderengpässe aufgrund klimabedingter Ertragsschwankungen durch die bestehenden Lagerkapazitäten ausgeglichen werden. Die Beeinträchtigung des Abbaus von Uran – wenngleich dieser nicht in Deutschland erfolgt – wird ebenfalls als gering eingestuft. Hinzu kommt, dass Kernkraft als Energieträger in Deutschland mit vollzogenem Atomausstieg ab dem Jahr 2022 keinen Beitrag mehr zur Energieerzeugung leisten wird.



⁴⁶ Vgl. Lauwe (2009), Scheele / Oberdörffer (2011) und Bardt et al. (2013). Diese Gefährdung bezieht sich dabei auf die Förder- und Raffinerieanlagen und betrifft damit sowohl die Rohstoffverwendung als Brennstoff in Kraftwerken als auch die Verwendung von Kraftstoff im Verkehrssektor.

⁴⁷ Vgl. Hirschl / Dunkelberg (2009) und Kuckshinrichs (2008).

⁴⁸ Für weiterführende Informationen zu Methanhydraten vgl. Groth (o. A).

⁴⁹ Vgl. Bardt et al. (2013).

⁵⁰ Vgl. zum folgenden – soweit nicht anders angegeben – Bardt et al. (2013).

⁵¹ Vgl. Hirschl / Dunkelberg (2009); ob sich dies allerdings auf zu viel Wasser (bei Starkregen oder Fluten), zu wenig Wasser (bei Dürren) oder auf beides bezieht, geht aus der Quelle nicht hervor. Kuckshinrichs et al. (2008) sehen sowohl bei zunehmenden als auch abnehmenden Wassermengen (Grundwasser, Niederschläge) Auswirkungen auf die Tagebaulogistik.

Der Abbau von **Steinkohle** erfolgt unter Tage, daher werden keine klimabedingten Beeinträchtigungen der Gewinnung in Deutschland erwartet. Deutschland ist aber auf Steinkohleimporte angewiesen und es werden durchaus negative Auswirkungen auf die Förderung von Steinkohle in anderen Regionen der Welt erwartet.⁵²

Neben der tendenziell als eher gering eingeschätzten Betroffenheit bei der Gewinnung der Rohstoffe werden klimabedingte Beeinträchtigungen des **Transportes** der Energieträger zu den Kraftwerken am ehesten dort erwartet, wo die zugrundeliegende Infrastruktur sensibel auf klimatische Veränderungen reagiert. Dies betrifft in erster Linie den Transport mit Schiffen; so kann die Schiffbarkeit auf Binnenwasserstraßen durch zu hohe Pegelstände aufgrund zunehmender Niederschläge im Frühjahr und zu niedriger Pegelstände aufgrund abnehmender Niederschläge im Sommer beeinträchtigt werden.⁵³ Bei Fluten kann der Transport mit der Bahn als Ausweichtransportmittel empfindlich gestört sein. In den meisten Quellen wird hinsichtlich dieser Beeinträchtigung kein Unterschied zwischen verschiedenen Energieträgern gemacht. Lediglich Kuckshinrichs et al. sehen diesen Effekt in erster Linie bei der Versorgung von Steinkohlekraftwerken.⁵⁴

Alleinig Hirschl und Dunkelberg erwähnen die mögliche Gefährdung der Pipelines durch Wetterextreme als Gefährdungspotenzial für die Rohstoffversorgung.⁵⁵

5.2 Regenerative Energieträger

Klimawandelbedingte Veränderungen wirken sich verschiedentlich auch auf die Gewinnung bzw. die Verfügbarkeit regenerativer Energieträger aus.

Für die Nutzung von **Biomasse** zur Energieerzeugung zeichnen sich zwei durch klimatische Einflüsse bedingte Betroffenheiten ab: aufgrund der trockener werdenden Sommer verkürzen sich die Anbauperioden und damit potenziell die Verfügbarkeit von z. B. Mais als Energiepflanze.⁵⁶ Hinzu kommt, dass die Energie gegenwärtig noch zu einem überwiegenden Anteil aus den Pflanzen selbst und nicht aus deren Abfallstoffen gewonnen wird; hier könnte sich eine zunehmende Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelnutzung abzeichnen,⁵⁷ die in Lieferengpässen resultieren kann. Zudem können Extremwetterereignisse das Angebot an Biomasse beeinträchtigen.⁵⁸ Diese Effekte sind sowohl in einem globalen, als auch einem regionalen Maßstab zu betrachten und wirken sich tendenziell negativ aus.

⁵² So führen Bardt et al. (2013) die Überflutung mehrerer Steinkohleminen in Australien an, die eine Verknappung des Angebotes auf dem Weltmarkt und damit Lieferengpässe und Preissteigerungen zur Folge hatte.

⁵³ Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007), Bundesregierung (2008), Hirschl / Dunkelberg (2009), Lauwe (2009) sowie ähnlich auch Scheele / Oberdörffer (2011) und Bardt et al. (2013).

⁵⁴ Vgl. Kuckshinrichs et al. (2008).

⁵⁵ Vgl. Hirschl / Dunkelberg (2009).

⁵⁶ Vgl. Scheele / Oberdörffer (2011) sowie Kuckshinrichs et al. (2008).

⁵⁷ Vgl. Bardt et al. (2013) und Gößling-Reisemann (o. J.). Im Zusammenwirken mit weiteren Faktoren, wie der nur schwierig zu prognostizierenden Entwicklung des politisch-gesellschaftlichen Handlungsrahmens, sieht Gößling-Reisemann hier eine hohe Betroffenheit für die Region Bremen-Oldenburg. Inwieweit sich diese Aussagen verallgemeinern lassen, bleibt offen.

⁵⁸ Vgl. Bundesregierung (2008) und Scheele / Oberdörffer (2011).

Die verfügbare Wassermenge beeinträchtigt nicht nur die Schiffbarkeit (s. vorheriger Abschnitt), sondern auch die Energieerzeugung in **Wasserkraftanlagen** durch zu viel bzw. zu wenig Wasser. Unterschieden werden muss hier zwischen Laufwasserkraftwerken und Speicherkraftwerken, wobei Laufwasserkraftwerke sensibler auf niedrige oder zu hohe Pegelstände reagieren. Dies führt günstigstenfalls nur zu einer reduzierten Auslastung, schlimmstenfalls müssen die Anlagen ganz abgeschaltet werden.⁵⁹



Hinsichtlich der Verfügbarkeit bzw. Nutzung der **Sonnenenergie** muss zwischen Photovoltaikanlagen und solarthermischen Anlagen unterschieden werden. Während für Photovoltaikanlagen die „Verfügbarkeit“ der Sonne nur bedingt notwendig ist (PV-Anlagen erzeugen beispielsweise auch bei bewölktem Himmel Energie), liefern solarthermische Kraftwerke nur bei direkter Sonneneinstrahlung Energie. Aufgrund der eingangs angerissenen Klimaänderungen wird

für Solaranlagen insgesamt mit einer zunehmenden Leistung im Sommer gerechnet.⁶⁰ Für die Wintermonate zeigen sich unterschiedliche Einschätzungen. Bardt et al. kommen in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass im Winter mit einer Abnahme der Kapazitäten zu rechnen sei,⁶¹ während Scheele und Oberdörffer zu der Einschätzung gelangen, dass sich die Voraussetzungen für solarthermische Anlagen aufgrund einer Abnahme der Schneemenge, der Schneebedeckung und der Schneetage insbesondere in den Wintermonaten verbessern.⁶²

⁵⁹ Vgl. Kuckshinrichs et al. (2008), Scheele / Oberdörffer (2011) sowie Bardt et al. (2013), Lauwe (2009) und Finley / Schuchard (2009).

⁶⁰ Vgl. Scheele / Oberdörffer (2011) und Bardt et al. (2013).

⁶¹ Vgl. Bardt et al. (2013). Ob sich die Effekte aus Ertragssteigerung im Sommer und Ertragsminderung im Winter über das Jahr ausgleichen, oder eine Zu- bzw. Abnahme der durchschnittlichen Erträge je Anlage zu erwarten ist, ist den Quellen nicht zu entnehmen.

⁶² Vgl. Scheele / Oberdörffer (2011).

6. Energieerzeugung und -umwandlung

6.1 Konventionelle Energieträger

Die Energieerzeugung aus konventionellen Energieträgern wird künftig wesentlich durch zwei Faktoren beeinträchtigt: zum einen die bereits mehrfach erwähnte Verfügbarkeit und Temperatur von **Wasser** zur Kühlung der Kraftwerke und zum anderen durch insbesondere in den Sommermonaten steigenden **Durchschnittstemperaturen** (sowohl der Luft, als auch des Wassers). Beide Faktoren beeinträchtigen allerdings nicht die Energieerzeugung aus einem bestimmten Energieträger, als vielmehr die Erzeugung in einem bestimmten Kraftwerkstyp.

Von den beiden genannten Einflussgrößen sind **Braunkohlekraftwerke** am geringsten betroffen. Zwar handelt es sich hierbei – wie bei Steinkohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie auch – um Dampfkraftwerke, die auf die Verfügbarkeit von Kühlwasser angewiesen sind, es zeigen sich jedoch unterschiedliche Einschätzungen bezüglich der Betroffenheit. Während Hirschl und Dunkelberg die Leistungsfähigkeit aller thermischen Kraftwerke grundsätzlich durch ein im Sommer geringeres Wasserdargebot (sowohl Grund- als auch Flusswasser) zur Kühlung betroffen sehen,⁶³ kommen Bardt et al. in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass Braunkohlekraftwerke zur Kühlung in erster Linie das aus dem meist nahe gelegenen Tagebau abgepumpte Wasser verwenden und damit weniger von der Kühlwasserproblematik betroffen seien. Sie sehen die Leistungsfähigkeit eher durch hohe Temperaturen beeinträchtigt, die physikalisch gering, aber wirtschaftlich spürbar seien. Die Wirkungsgradverluste aufgrund hoher Außentemperaturen sind bei allen thermischen Kraftwerkstypen gleichermaßen feststellbar, bei Gaskraftwerken aber besonders deutlich.⁶⁴ Bardt et al. gelangen darüber hinaus zu dem Ergebnis, dass Gaskraftwerke die am stärksten vom Klimawandel betroffenen Kraftwerkstypen sein werden.⁶⁵

Anders als Braunkohlekraftwerke, die sich meist in der Nähe der Rohstoffquellen – also in der Nähe der Tagebaue – befinden, stehen andere **thermische Kraftwerke (Steinkohle, Gas, Öl, Kernkraft)** häufig an Flüssen. Dies sichert zum einen die gute logistische Versorgung mit den Rohstoffen via Schiff, zum anderen ist die Verfügbarkeit von Kühlwasser aus dem Fluss gegeben. In Hitzeperioden können die Wasserentnahmemengen aufgrund sinkender Flusspegel allerdings eingeschränkt sein bzw. werden,⁶⁶ zudem darf das wieder eingeleitete Wasser aus wasserrechtlichen Gründen eine bestimmte Temperatur nicht überschreiten (die im Sommer aber ohnehin schon erhöht ist). Beides kann dazu führen, dass die betroffenen Kraftwerke gedrosselt werden müssen oder weniger effizient arbeiten,⁶⁷ da mehr der erzeugten Energie für das Pumpen eingesetzt werden muss.⁶⁸ Aufgrund beider Tatsachen sieht Engelhardt die Kraftwerke an Oberläufen weniger stark betroffen als Kraftwerke

⁶³ Vgl. Hirschel / Dunkelberg (2009).

⁶⁴ Vgl. Wachsmuth et al. (2012), Bardt et al. (2013) und Engelhardt (2009).

⁶⁵ Vgl. Bardt et al. (2013). Diese Einschätzung findet sich auch in anderen Quellen, vgl. hierzu ebenfalls Kuckshinrichs et al. (2008), Hirschel / Dunkelberg (2009) und Lauwe (2009).

⁶⁶ Hier entsteht eine dreifache Nutzungskonkurrenz um die in Hitzeperioden eingeschränkte Wasserverfügbarkeit – Trinkwassergewinnung, Beregnungswasser für die Landwirtschaft und eben Kühlwasser für die Kraftwerke; vgl. Finley / Schuchard (2009).

⁶⁷ Vgl. Europäische Kommission (2007), Bundesregierung (2008), Kuckshinrichs et al. (2008), Hirschel / Dunkelberg (2009), Lauwe (2009), Finley / Schuchard (2009), Engelhardt (2011), Wachsmuth et al. (2012) und Bardt et al. (2013).

⁶⁸ Vgl. Ekeland et al. (2008).

an Flussunterläufen.⁶⁹ Von zu hohen Pegelständen werden thermische Kraftwerke, anders als Laufwasserkraftwerke, nicht beeinträchtigt.

In beiden Studien finden sich unterschiedliche Einschätzungen zur Kühlwasserproblematik. Sowohl Bardt et al. als auch Engelhardt gelangen zu dem Ergebnis, dass die Kühlung künftig von der Verfügbarkeit von Flusswasser unabhängiger werde, da die Kraftwerke zunehmend über Kühltürme verfügen. Hirschl und Dunkelberg sehen die Effizienz der Kühltürme insbesondere bei hohen Temperaturen allerdings ebenfalls beeinträchtigt.⁷⁰ Auch hier scheint weiterer Untersuchungsbedarf zu bestehen.

6.2 Regenerative Energieträger

Bei der **Windkraftnutzung** muss, wie bei der Förderung von Gas und Öl auch, zwischen on- und off-shore unterschieden werden. So sind die on-shore Anlagen wesentlich durch eine mögliche Zunahme von Starkwinden in zweierlei Hinsichten beeinträchtigt – einerseits steigen die Anforderungen an die Standfestigkeit von Windkraftanlagen, andererseits könnte es passieren, dass Anlagen häufiger abgeschaltet werden müssen.⁷¹ Allerdings sind diese Zeiten auf die Laufzeit je Anlage und Jahr betrachtet zu vernachlässigen. Zudem können moderne Anlagen auch bei hohen Windgeschwindigkeiten mit eingeschränkter Kapazität operieren.⁷² An off-shore Anlagen werden zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Standfestigkeit aufgrund des steigenden Meeresspiegels und einer möglichen Zunahme von Sturmfluten gestellt.⁷³

Die Erzeugungsanlagen zur Nutzung der **Sonnenenergie** werden allgemein als robust gegen klimatische Veränderungen eingeschätzt. Weder Photovoltaik- noch Solarthermie-Anlagen werden in ihrem Betrieb durch höhere Temperaturen beeinträchtigt. Eine geringe Anfälligkeit zeigt sich lediglich bei Wetterextremen wie Starkwinden, Hagel und Blitzschlag, wodurch Anforderungen an die Sicherheit der Befestigung beispielsweise auf Hausdächern steigen könnten.⁷⁴ Ekeland et al. weisen in einem frühen Dokument darauf hin, dass die Effizienz von Photovoltaikanlagen bei hohen Temperaturen und insbesondere bei länger anhaltenden Hitzewellen geringfügig reduziert sein kann.⁷⁵ Kuckshinrichs et al. weisen auf diesen Aspekt ebenfalls hin, sehen diesen aber noch nicht ausreichend geklärt.⁷⁶



⁶⁹ Vgl. Engelhardt (2011).

⁷⁰ Vgl. Bardt et al. (2013), Engelhardt (2011) und Hirschl / Dunkelberg (2009) und Kuckshinrichs et al. (2008).

⁷¹ Vgl. Hirschl / Dunkelberg (2009), Lauwe (2009), Scheele / Oberdörffer (2011) und Bardt (2013).

⁷² Vgl. Bardt (2013).

⁷³ Vgl. Hirschl / Dunkelberg (2009) und Scheele / Oberdörffer (2011).

⁷⁴ Vgl. Bundesregierung (2008), Scheele / Oberdörffer (2011) und Bardt et al. (2013).

⁷⁵ Vgl. Ekeland et al. (2008).

⁷⁶ Vgl. Kuckshinrichs et al. (2008). In späteren Dokumenten wird auf diesen Aspekt nicht mehr eingegangen.

Die Kraftwerke zur Erzeugung von Energie aus **Biomasse**⁷⁷ sind hinsichtlich Beeinträchtigungen im operativen Betrieb ähnlich einzuschätzen wie Braunkohlekraftwerke. Höhere Außentemperaturen – das zeigt der Betrieb vergleichbarer Anlagen an unterschiedlichen Standorten – beeinträchtigen die Wirkungsgrade nur geringfügig, die Kühlwasserproblematik entsteht nur bei größeren und komplexeren Anlagen und selbst dort ist der Kühlwasserbedarf deutlich geringer als bei anderen thermischen Kraftwerken. Demgegenüber ist zu erwarten, dass vor allem der Ertrag aus Biomasse von den Folgen des Klimawandels beeinflusst wird, da die Bodenbeschaffenheit kaum geschützt werden kann.

Auf die Gewinnung von Energie aus **Erdwärme (Geothermie)** werden für Deutschland keine spürbaren Auswirkungen durch den Klimawandel erwartet – diese Einschätzung bezieht sich einerseits auf den Betrieb der Anlagen, andererseits aber auch auf Ertragsschwankungen, wie sie für die anderen Kraftwerke zum Teil zu erwarten sind.

Insgesamt werden die Erzeugungsanlagen in allen Studien als äußerst robust gegen klimatische Veränderungen eingeschätzt. Als anfällig gelten die Anlagen im Hinblick auf Wetterextreme. Die Erzeugung selbst ist durch den Klimawandel nicht nennenswert beeinträchtigt.

⁷⁷ Vgl. Bardt (2013). Diese Studie ist die einzige der hier ausgewerteten Studien, die diesen Aspekt der Energieerzeugung berücksichtigt. Selbiges trifft auf die Ausführungen zur Erdwärmennutzung zu.

7. Verteilung

Der Wertschöpfungsstufe Verteilung wird in den Studien übereinstimmend die größte Anfälligkeit attestiert. Davon ist zum einen die physikalische Leitungsfähigkeit bei hohen Temperaturen im Sommer und niedrigen Temperaturen im Winter betroffen,⁷⁸ zum anderen kann die Übertragungsinfrastruktur (Masten, Kabel, Transformatoren) selbst durch Wetterextreme beeinträchtigt beziehungsweise beschädigt werden.

Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Betroffenheit in den unterschiedlichen Netzen. Während die Verteilnetze bereits heute zu einem beträchtlichen Teil unterirdisch verlaufen und somit nur eine geringe Klimaexposition gegeben ist,⁷⁹ verlaufen die Übertragungsnetze größtenteils überirdisch und sind den Wetter- und Klimaeinflüssen direkt ausgesetzt. Problematisch ist dies aus zwei Gründen: zum einen spielen die Übertragungsnetze eine wichtige Rolle nicht nur im nationalen Netzverbund. Als Transitland in einem integrierten europäischen Strommarkt müssen über diese Netze große Mengen insbesondere erneuerbarer Energien aus Skandinavien und den deutschen off-shore Windparks transportiert werden. Zum anderen kann dieser Teil der Netze aufgrund der hohen Kosten für die unterirdische Verlegung schlecht umgebaut werden.⁸⁰



Die Auswirkungen auf den oberirdischen Teil der Netze können dabei vielfältig sein. Wenngleich die Masten und Leitungen grundsätzlich auf Wetterextreme ausgelegt sind, so können sie z. B. durch hohe Eis- bzw. Schneelasten (siehe Abb. 2) oder Blitzschläge beschädigt werden.⁸¹

Ein weiteres Gefährdungspotenzial geht von Hochwasserereignissen aus. Einerseits könnten Mastfundamente unterspült werden, was veränderte Anforderungen an die Standfestigkeit mit sich bringen würde, andererseits könnten Umspannungsanlagen von Hochwasser zunehmend durch Überflutung betroffen sein.⁸²

Wenngleich die Überlandverkabelung besonders exponiert gegenüber klimatischen Einflüssen ist, so finden sich vereinzelt auch Gefährdungspotenziale für Erdkabel. So könnten

⁷⁸ Vgl. Ekeland et al. (2008), Hirschl / Dunkelberg (2009), Finley / Schuchard (2009), Dunkelberg et al. (2009) und Bardt (2013).

⁷⁹ Vgl. Engelhardt (2011).

⁸⁰ Vgl. Bardt et al. (2013).

⁸¹ Vgl. Bundesregierung (2008), Hirschl / Dunkelberg (2009) und Scheele / Oberdörffer (2011). Es ist allerdings wahrscheinlich, dass der Zusammenbruch der Masten nicht monokausal auf die Eis- und Schneelast zurückzuführen ist. Es gab Hinweise, dass erst das Zusammenwirken der Eis- und Schneemassen zusammen mit Wind, der die Leitungen in Schwingung versetzte, zur Beschädigung führte. Vgl. hierzu z. B. Lauwe (2009) und Schmitt (2012.), Kap. 2.

⁸² Vgl. z. B. Europäische Kommission (2007) und ähnlich auch Bundesregierung (2008).

durch Hochwasser bspw. Kabeltrassen freigespült⁸³ oder in langen Hitzeperioden Schäden an Erdkabeln entstehen.⁸⁴ Wachsmuth et al. weisen allerdings darauf hin, dass noch keine Wirkmodelle vorlägen, „(...) die ein verändertes Ausfallverhalten im Zusammenhang mit einer Veränderung von Klima- oder Wetterparametern (Bodentemperatur und Bodenfeuchte) erklären könnten.“⁸⁵

Neben diesen externen physischen Beeinträchtigungen der Netzinfrastruktur können die Netze durch weitere „interne“ Gegebenheiten belasten werden.⁸⁶ So kann es zu einer Überlastung der Netze kommen, wenn zu viel Windenergie eingespeist wird; der Anteil windbedingter Versorgungsstörungen ist seit den 1970er Jahren kontinuierlich angestiegen.⁸⁷ Zudem kann sich die Lebensdauer von Transformatoren reduzieren, sofern diese häufig im Spitzenlastbereich arbeiten müssten. Insofern werden aus der zunehmenden Einspeisung von Windenergie verschiedene Betroffenheiten resultieren.

In den ausgewerteten Quellen finden sich keinerlei Ausführungen zu möglichen klimabedingten Beeinträchtigungen anderer Verteilinfrastrukturen wie beispielsweise Pipelines.

⁸³ Vgl. Hirschl / Dunkelberg (2009). Zu dem letztgenannten Aspekt siehe ebenfalls Dunkelberg et al. (2009).

⁸⁴ Vgl. Hirschl / Dunkelberg (2009) und Kuckshinrichs (2008).

⁸⁵ Wachsmuth et al. (2012). Expertenconsultationen im Rahmen des Projektes nordwest2050 haben ebenfalls zu keinen belastbaren Erkenntnissen geführt.

⁸⁶ Vgl. Kuckshinrichs (2009) und Hirschl / Dunkelberg (2009).

⁸⁷ Vgl. Dunkelberg et al. (2009).

Teil C

Schlussbetrachtungen

8. Ergebnisdarstellung und Handlungsempfehlungen

Die Zusammenführung des vorhandenen Wissens hinsichtlich der Betroffenheit des Energiesektors in Bezug auf zu erwartende klimatische Veränderungen hat gezeigt, dass alle hier betrachteten Bereiche der Wertschöpfungskette zumeist negativ betroffen sein werden. Die wesentlichen Einflussfaktoren werden dabei das Wasserdargebot (sowohl zu viel als auch zu wenig Wasser kann problematisch sein), Extremwetterereignisse und steigende Durchschnittstemperaturen sein. Auch wenn sich bei einzelnen Aspekten unterschiedliche Einschätzungen gezeigt haben, so können zwei zentrale Punkte als Ergebnis festgehalten werden:

- die Betroffenheit wird insgesamt als gering und gut handhabbar eingeschätzt
- unbestritten ist das Übertragungsnetz die am stärksten betroffene Wertschöpfungsstufe

In der Tabelle 1 sind die Betroffenheiten nach Energieträgern und Wertschöpfungsstufen zusammengestellt.

Daneben wird allerdings auch die Energienachfrage unmittelbar durch den Klimawandel beeinflusst. Vor dem Hintergrund der grundsätzlich als gering eingestuften Betroffenheit der Angebotsseite dürfte die größte Anpassungsherausforderung in der zu gewährleistenden Versorgungssicherheit bestehen. Als Folge der beschriebenen klimatischen Veränderungen kann es beispielsweise zu einer Verknappung des Energieangebots, Preissteigerungen und Versorgungsstörungen kommen. Ebenfalls sind für Kraftwerke, die von Wetterextremen bedroht sind, steigende Versicherungskosten zu erwarten. Auf der hier nicht betrachteten marktlichen Ebene der Betroffenheit wiederum ist zu erwarten, dass es in Folge eines allgemeinen Anstiegs der Lufttemperatur zu einem Rückgang der Nachfrage nach Heizenergie kommen wird, während der Bedarf nach Kühlenergie beispielsweise in Form von Klimaanlage steigt wird. Außerdem wird sich die Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energien sehr wahrscheinlich erhöhen. Veränderte Klimabedingungen eröffnen damit neue Perspektiven für den Energiemix der Zukunft und das Erfordernis, Angebot und Nachfrage besser zu verwalten und ein Versorgungsnetz zu sichern, das der zunehmend schwankenden Balance aus Stromnachfrage und Stromerzeugung gerecht wird.⁸⁸

Es wurde insgesamt deutlich, dass neben Ansätzen zur Vermeidung des Klimawandels zunehmend auch eine Anpassung an dessen nicht mehr abzuwendende Folgen notwendig ist. Dabei ist gerade der Energiesektor prädestiniert dafür, Synergien zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung zu nutzen. Es sollten daher zunächst so genannte no-regret-Maßnahmen identifiziert werden. Dies sind Maßnahmen, bei denen die Klimaanpassung mit anderen Nutzen kombiniert werden kann und die somit auch dann sinnvoll sind – beispielsweise durch die Vermeidung von CO₂-Emissionen –, wenn der Klimawandel nicht in der erwarteten Ausprägung eintreten sollte.⁸⁹

⁸⁸ Vgl. Europäische Kommission (2007).

⁸⁹ Vgl. Moser (2012) und Leidreiter et al. (2013).

Energie-träger	Wertschöpfungsstufe			
	Gewinnung / Verfügbarkeit	Ressourcen-transport	Energieerzeugung	Verteilung
Braunkohle	keine direkten Auswirkungen ggf. Auswirkungen bei Wetterextremen (Wasserhaltung, Abrutschungen)	keine Auswirkungen (Abbau erfolgt in der Nähe der Kraftwerke)	Kühlproblematik thermischer Kraftwerke insb. bei eingeschränktem Kühlwasserdargebot (sowohl quantitativ als auch qualitativ) Wirkungsgradverluste thermischer Kraftwerke bei hohen Außentemperaturen (Gaskraftwerke am stärksten betroffen)	übereinstimmend größte Anfälligkeit physikalische Leitungsfähigkeit bei hohen und niedrigen Temperaturen beeinträchtigt Übertragungsinfrastruktur (Transformatoren, Kabel, Masten) kann durch Wetterextreme beschädigt werden
Steinkohle	keine direkten Auswirkungen im Inland (ggf. in anderen Regionen)	Auswirkungen durch extreme Wetterereignisse, z. B. Hoch- oder Niedrigwasser auf Binnenschiff-fahrtsstraßen ggf. Gefährdung von Pipelines durch extreme Wetterereignisse		
Uran	siehe Braunkohle (erfolgt nicht im Inland)			
Erdgas	keine Beeinträchtigung bei on-shore Förderung bei off-shore Förderung ggf. Beeinträchtigung durch Zunahme von Wetterextremen			
Erdöl	Meeresspiegelanstieg unproblematisch		keine Auswirkungen auf die Anlage selbst Energiegehalt der Pflanzen durch verkürzte Anbauperiode ggf. geringer	
Biomasse	wärmere Sommer bedingen kürzere Anbauperioden und damit die Verfügbarkeit ggf. zunehmende Nutzungskonkurrenz zu Nahrungsmitteln Wetterextreme können Energiepflanzen schädigen oder zerstören	keine Auswirkungen auf die Anlagen selbst	keine direkte Beeinträchtigung, geringe Anfälligkeit gegen Wetterextreme (Starkwinde, Hagel, Blitzschlag)	
Wasser	Wasserkraftnutzung wird bei Hoch- und Niedrigwasser beeinträchtigt			
Sonne	bessere Erzeugungsbedingungen im Sommer (insb. für solarthermische Anlagen) im Winter unterschiedliche Einschätzungen			
Wind	---			

Tabelle 1: Anfälligkeiten nach Energieträgern und Wertschöpfungsstufen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Maßnahmen zur Anpassung jeweils den regionalen oder lokalen Gegebenheiten genügen müssen. Ökonomisch betrachtet, sind dies also in stärkerem Maße private Güter als die Aktivitäten zur Vermeidung des Klimawandels. Der Grund ist darin zu sehen, dass von Anpassungsmaßnahmen meistens nur die unmittelbar Betroffenen profitieren, während die Vorteile von Klimaschutzmaßnahmen von einem globalen Nutzen sind. Daher stellt sich auch die Frage, inwieweit staatliche Regulierungen zur Anpassung im Energiesektor notwendig sind. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass jeder Energieversorger ein wirtschaftliches Eigeninteresse daran hat, dass der Betrieb seiner Anlagen nicht gestört wird. Somit ist die Anpassung der Energiewirtschaft an den Klimawandel ein privates Gut, das marktwirtschaftlich bereitgestellt werden sollte. Eine besondere Ausnahme bilden vor allem die Netze, da Investitionen hier der Netzregulierung unterliegen. Ein positiver Beitrag durch staatliche Aktivitäten ist zudem dort zu erwarten und notwendig, wo die Anpassung an den Klimawandel beispielsweise durch die Verbesserung der Wissens- und Informationsbasis im Hinblick darauf unterstützt wird, welche regionalen Auswirkungen in Folge des Klimawandels zu erwarten sind.

Zudem wäre es denkbar, auch in Deutschland unternehmerische Berichtspflichten zum Stand der Anpassungsplanungen für kritische Infrastrukturen⁹⁰ einzuführen. In Großbritannien wurde dies im Rahmen des Climate Change Act 2008 bereits festgeschrieben, wobei entsprechende Berichte im Abstand von 5 Jahren zu erstellen sind.⁹¹

Vor dem Hintergrund der langen Lebensdauern einmal errichteter Einrichtungen – insbesondere der Kraftwerke und Netze – zeigt sich deutlich, dass bei dem bevorstehenden Umbau der Energieinfrastruktur im Rahmen der Energiewende auch Aspekte der zukünftigen Verletzlichkeit des Energiesystems beziehungsweise insbesondere der Energieinfrastruktur gegenüber dem Klimawandel berücksichtigt werden sollten. Im Rahmen der aktuellen energiepolitischen Diskussion scheint dies bislang nicht oder zu gering beachtet zu werden.

Die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels sollten nach Möglichkeit also schon jetzt bei den anstehenden Infrastrukturmaßnahmen im Zuge der Energiewende Berücksichtigung finden und die Transformation der Energiesysteme auch zum Beseitigen entsprechender Schwachstellen genutzt werden. Dafür ist aber eine möglichst umfassende Informationsgrundlage notwendig. Dabei ist im Rahmen der bisherigen Aktivitäten zur Analyse der Betroffenheit des Energiesektors ein Themenfeld konsequent ausgeblendet worden, das aber gerade für den beabsichtigten Ausbau der erneuerbaren Energien und deren Einbindung in die bestehende Infrastruktur von enormer Bedeutung ist: die Speicher und deren Anfälligkeit bei hohen oder niedrigen Temperaturen. In welchem Umfang können beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke bei geringem Wasserdargebot oder sehr niedrigen Temperaturen



⁹⁰ Vgl. Europäische Kommission (2008).

⁹¹ Vgl. Leidreiter et al. (2013).

genutzt werden? Neben die physikalischen Herausforderungen tritt die zweifelsfrei nicht triviale Frage der Einbindung der Speicher in die bestehende und zukünftig notwendige Infrastruktur.

Insgesamt geht es also auch bei der Energiewende um weit mehr als den stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien. Es muss vor allem der konzeptionell abgestimmte Infrastrukturausbau – insbesondere der Speicher und Netze – deutlich vorangetrieben werden. Zudem sollten zeitnah auch Aspekte der Resilienz der energieintelligenten Systeme gegenüber dem Klimawandel berücksichtigt werden, denn der fortschreitende Klimawandel könnte hier in den kommenden Jahrzehnten neue Anforderungen mit sich bringen.

Literatur

- Bardt, H. et al. (2013): Einfluss des Klimawandels auf die deutsche Energieversorgung, in: Wirtschaftsdienst, 93 Jg., Nr. 5, S. 307-315.
- Bundesministerium des Innern (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie), Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011): Eckpunktepapier der Bundesregierung zur Energiewende, www.bmu.de/P1691 (15.8.2013).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013): Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2012 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Vorläufige Angaben. Stand 28. Februar 2013, Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007): Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels: Bestandsaufnahme, <http://www.bmvbs.de> (17.5.2013).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung, Berlin.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, <http://www.bmu.de/> (27.4.2013).
- Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, <http://www.bmu.de> (27.4.2013).
- Carbon Disclosure Project (Hrsg.) (2012): CDP Europe Adaptation Report 2012, <http://www.cdpproject.net> (27.4.2013).
- Deuschländer, T. / Dalelane, C. (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Offenbach am Main.
- Dubus, L. / Parey, S. (2012): Developing climate services – the role of the energy sector, in: World Meteorological Organization (Hrsg.): Climate ExChange, ohne Ort, S. 160 ff.
- Dunkelberg, E. et al. (2009): Ergebnisse des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels – Energiewirtschaft, <http://www.anpassung.net> (27.8.2013).
- Eden, S. et al. (2013): Statista Branchenreport 2013 – Energieversorgung, Hamburg.
- Engelhard, P. (2011): Erwartungen an die Anpassungspolitik, Vortrag auf dem Workshop der Forschungsgruppe Chamäleon und dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 5.4.2011, Berlin, <http://www.climate-chameleon.de/> (20.5.2013).
- Eskeland, G. et al. (2008): The Future of European Electricity – Choices before 2020, <http://www.ceps.eu> (2.7.2013).
- Europäische Kommission (2007): Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen und Maßnahmen der EU, Brüssel.
- Europäische Kommission (2008): Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the Identification and Designation of European Critical Infrastructures and the Assessment of the Need to Improve their Protection, Brüssel.

- Feix, O. et al. (2013): Netzentwicklungsplan Strom 2013 – Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, <http://www.netzentwicklungsplan.de> (9.9.2013).
- Finley, T. / Schuchard, R. (2009): Adapting to Climate Change – A Guide for the Energy and Utility Industry, <http://www.bsr.org/adaptation> (27.4.2013).
- Fischer-Bruns, I. (2011): Treibhauseffekt und Emissionsszenarien, Dossier im Klimanavigator, <http://www.klimanavigator.de/dossier/index.php> (15.8.2013).
- Frontier Economics (2008): Kosten von Stromversorgungsunterbrechungen. Studie im Auftrag der RWE AG, <http://www.frontier-economics.com> (4.7.2013).
- Fuchs, G. et al. (2012): Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität. Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Stuttgart.
- Global Carbon Project (2012): Global Carbon Budget 2012, <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/index.htm> (18.7.2013).
- Gößling-Reisemann, S. (o. J.): Verwundbarkeitsanalyse Energiewirtschaft – Wie verwundbar ist die Energiewirtschaft in der Metropolregion Bremen-Oldenburg?, <http://www.nordwest2050.de> (22.8.2013).
- Gößling-Reisemann, S. et al. (2012): Klimawandel – Regionale Verwundbarkeit der Energieversorgung in Deutschland, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 62. Jg., Nr. 4, S. 60-63.
- Groth, M. (o. A.) Welche Potentiale und Risiken birgt die Nutzung von Methan aus Methanhydraten? http://www.climate-service-center.de/034268/index_0034268.html.de (2.9.2013).
- Groth, M. / Wacker, T. (2012): Klimapolitik – Instrumentenmix und Machbarkeit, in: Wirtschaftsdienst – Zeitschrift für Wirtschaftspolitik, Sonderheft 2012, S. 2-4.
- Groth, M. (2012a): Speichertechnologie und weitere Ausblicke auf die Zukunft des EEG – Kommentar zum Beitrag von Thomas Schomerus, in: Ekardt, F., Hennig, B. und Unnerstall, H. (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Ambivalenzen, Governance, Rechtsfragen, Marburg, S. 253-256
- Groth, M. (2012b): Stromspeicherung – gesetzliche Regelungen notwendig, in: Wirtschaftsdienst – Zeitschrift für Wirtschaftspolitik, 92. Jg., Nr. 4, S. 216-217.
- Hirschl, B. / Dunkelberg, E. (2009): Problemaufriss – Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft, Vortrag bei dem Stakeholderdialog zu Chancen und Risiken des Klimawandels – Energiewirtschaft, 30.6.2009, Dessau, <http://www.anpassung.net> (27. Aug. 2013).
- Hollinger, R. et al. (2013): Speicherstudie 2013 – Kurzgutachten zur Abschätzung und Einordnung energiewirtschaftlicher, ökonomischer und anderer Effekte bei Förderung von objektgebunden elektrochemischen Speichern, Freiburg.
- IPCC (2007): Klimaänderung 2007: Synthesebericht – Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger (deutsche Fassung), <http://www.de-ipcc.de> (27.4.2013).
- IPCC (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge (UK), New York.
- IPCC (2013): Climate Change 2013 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, <http://www.ipcc.ch>
- Jacob, D. et al. (2012): CSC Report 6 – Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland, Hamburg.

- KfW Bankengruppe (Hrsg.) (2013): Merkblatt Erneuerbare Energien – Programmnummer 275: Finanzierung von stationären Batteriespeichersystemen in Verbindung mit einer Photovoltaikanlage, Frankfurt.
- Kuckshinrichs, W. et al. (2008): Annex 2, in: Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) an den Klimawandel – Bericht zum Nationalen Symposium zur Identifizierung des Forschungsbedarfs, <http://www.ufz.de/das/index.php?de=16738> (25.5.2013).
- Lauwe, P. (2009): Die kritische Infrastruktur Energieversorgung, Vortrag bei dem Stakeholderdialog zu Chancen und Risiken des Klimawandels – Energiewirtschaft, 30. Juni 2009, Dessau, <http://www.anpassung.net> (27.8.2013).
- Leidreiter, A. et al. (2013): From Vision to Action – A Workshop Report on 100% Renewable Energies in European Regions, <http://www.climate-service-center.de> (15.8.2013).
- Leprieh, U. et al. (2012): Kompassstudie Marktdesign. Leitideen für ein Design eines Stromsystems mit hohem Anteil fluktuierender Erneuerbarer Energien, Bochum.
- Mahammadzadeh, M. et al. (2013): Klimaanpassung in Unternehmen und Kommunen – Betroffenheiten, Verletzlichkeiten und Anpassungsbedarf, in: Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Nr. 83, Köln.
- Moser S. C. (2012): Adaptation, Mitigation, and their Disharmonious Discontents – An Essay, in: Climatic Change (2012), S. 165-175.
- Pechan, A. et al. (2011): Eingestellt auf Klimafolgen? Ergebnisse einer Unternehmensbefragung zur Anpassung in der Energie- und Verkehrswirtschaft, Berlin.
- Pechan, A. (2011a): Klimawandelfolgen, Betroffenheit und Anpassung in der deutschen Energiewirtschaft – Ergebnisse eines Surveys, Vortrag auf dem Workshop der Forschungsgruppe Chamäleon und dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 5.4.2011, Berlin, <http://www.climate-chameleon.de/> (20.5.2013).
- Pehnt, M. / Höpfner, U. (2009): Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien – Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive, Kurzgutachten des IFEU Heidelberg, Heidelberg.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung, Sondergutachten, Berlin.
- Scheele, U. / Oberdörffer, J. (2011): Transformation der Energiewirtschaft – Zur Raumrelevanz von Klimaschutz und Klimaanpassung, www.nordwest2050.de (27.5.2013).
- Schmitt, R. (2012): Schneelast an Stromleitungen – Heute und in Zukunft, CSC Report 5, Hamburg.
- Stecker, R. et al. (2012): Anpassung an den Klimawandel – Agenda Setting und Politikintegration in Deutschland, in: Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, 35. Jahrgang, Nr. 2, S. 179-208.
- U.S.-Canada Power System Outage Task Force (Hrsg.) (2004): Final Report on the August 14 2003 Blackout in the United States and Canada – Causes and Recommendations, Washington, Ottawa.
- Wachsmuth, J. et al. (2012): Kapitel 4.8 – Energiewirtschaft, in: Schuchardt, B. / Wittig, S. (Hrsg.) (2012). Vulnerabilität der Metropolregion Bremen-Oldenburg gegenüber dem Klimawandel (Synthesebericht), nordwest2050-Berichte, Heft 2, Bremen und Oldenburg, S. 94-111.

Internetquellen

Bundesnetzagentur: <http://www.netzausbau.de>

Carbon Disclosure Project: <https://www.cdproject.net>

Climate Action Tracker: <http://climateactiontracker.org/>

Forschungsgruppe Chamäleon: <http://www.climate-chameleon.de/>

ForschungsVerbundErneuerbare Energien (FVEE): <http://www.fvee.de>

Global Carbon Project: <http://www.globalcarbonproject.org>

Klimanavigator: <http://www.klimanavigator.de>

Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes: <http://www.dwd.de/klimaatlas>

KLIMZUG: <http://www.klimzug.de>

Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) im Umweltbundesamt:
<http://www.anpassung.net>

Nordwest2050: <http://www.nordwest2050.de>

Regionale Klimaatlantent: <http://www.regionaler-klimaatlas.de>

Umweltforschungszentrum: <http://www.ufz.de/das/>

Fotos:

S. 7 Nadya Lukic/ istockphoto.com, S. 10 Bogentom/ istockphoto.com, S. 13 Omika/ fotolia,
S. 16 Wittelsbach bernd/ istockphoto.com, S. 18 Sasha Radosavljevic/ istockphoto.com, S.
RobertHoetink/ istockphoto.com, S. 22 shank_ali/ istockphoto.com, S. 24 RobertHoetink/
istockphoto.com, S. 28 Rafomundo/ istockphoto.com

Kontakt:

Climate Service Center
Fischertwiete 1
20095 Hamburg

Tel. 040-226 338-424
Fax. 040-226 338-163

www.climate-service-center.de

ISSN 2192-4058

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung