

# Infrastrukturen und Dienstleistungen in der Energie- und Wasserversorgung

*Hagen Koch, Helmut Karl, Michael Kersting, Rainer Lucas, Nicola Werbeck*

- 24.1 Zur Verletzlichkeit des Energiesystems in Deutschland – 244**
  - 24.1.1 Thermische Kraftwerke mit Wasserkühlung – 245
  - 24.1.2 Wasserkraftanlagen – 245
  - 24.1.3 Windkraftanlagen – 246
  - 24.1.4 Solarenergieanlagen – 246
  - 24.1.5 Ausblick Energiesystem – 247
- 24.2 Wasserversorgung im klimatischen, demografischen und wirtschaftlichen Wandel – 247**
  - 24.2.1 Determinanten des Wasserbedarfs – 247
  - 24.2.2 Bildung von Szenarien – 247
  - 24.2.3 Ausblick Wasserversorgung – 248
- 24.3 Kurz gesagt – 249**
  - Literatur – 250**

Technische und soziale Infrastrukturen zeichnen sich durch Basisfunktionen aus, die zur Versorgung und Entwicklung einer Volkswirtschaft benötigt werden. Mit dieser allgemeinen Definition wird bereits deutlich, dass die Störung der Funktionsfähigkeit von Infrastrukturen immer auch die zu versorgenden Bereiche einer Gesellschaft betrifft. Um diese Zusammenhänge zu erfassen, sind systemanalytische Ansätze geeignet, die in übergreifender Weise die Verletzlichkeit der technischen Infrastrukturbereiche beschreiben. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Planung und Gestaltung technischer Infrastrukturen durch eine hohe Pfadabhängigkeit – also eine hohe Abhängigkeit der weiteren Entwicklung von einmal getroffenen Entscheidungen – hinsichtlich der technischen und organisatorischen Systemgestaltung auszeichnen und somit eine Betrachtung über längere Zeiträume notwendig wird. Diese Pfadabhängigkeit mindert gleichzeitig die Fähigkeit, unmittelbar und flexibel auf Störereignisse zu reagieren.

Die Produktions- und Versorgungssysteme in Deutschland müssen sich langfristig an die Folgen des Klimawandels anpassen. Hierzu bedarf es zusätzlicher Investitionen in die Anlagen und Verteilnetze, um bei der Versorgung einen hohen Standard zu sichern. Um die Kosten für Produzenten und Nachfrager gering zu halten, sollten diese Investitionen im Rahmen des generellen Erneuerungs- und Ausbaubedarfs getätigt werden. Um den Investitionsbedarf abzuschätzen, können Szenarioanalysen erstellt werden (Gausemeier et al. 1996). Mittels dieses Instruments können unterschiedliche Zukünfte in Form von Sets von Änderungen relevanter Einflussgrößen modelliert und die sich daraus ergebenden Änderungen berechnet werden. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Szenariorechenläufe setzen einen Rahmen, der die vielfältigen Anpassungserfordernisse aufzeigt. Diese resultieren auch aus Einflussfaktoren, die nicht mit dem Klimawandel zusammenhängen, z. B. die ökonomische, demografische und technologische Entwicklung. Es besteht damit die Herausforderung, die Folgen des Klimawandels unter den allgemeinen Bedingungen gesellschaftlicher Transformation modellhaft zu erfassen.

## 24.1 Zur Verletzlichkeit des Energiesystems in Deutschland

Die Diskussion über die Verletzlichkeit des Energiesystems, das eine wichtige Voraussetzung für wirtschaftliche sowie gesellschaftliche Aktivitäten darstellt, hat in der Forschung zwei wesentliche Ausgangspunkte. Zum einen stehen bei der Analyse kritischer Infrastrukturen alle Gefahren im Mittelpunkt, die zu einer Unterbrechung der Versorgung führen können. Unter dem Aspekt der Naturgefahren werden zunehmend auch Klimawandelfolgen betrachtet, insbesondere für die Elektrizitätsversorgung in Deutschland (Birkmann et al. 2010). Zum anderen wurde im Rahmen des KLIMZUG-Projekts Nordwest 2050 auf Ansätze der Resilienzforschung zurückgegriffen (Gößling-Reisemann et al. 2013), um auf regionaler Ebene Gestaltungsempfehlungen für die Entwicklung des Energiesystems zu geben. Hierbei wurden die Folgen des Klimawandels unter den Bedingungen einer allgemeinen Transformation des Energiesystems betrachtet und Szena-

rien für ein resilientes regionalisiertes Energiesystem entworfen (Wachsmuth und Gößling-Reisemann 2013).

Das Umweltbundesamt (UBA) hat 2009/2010 einen Stakeholderdialog zu den Chancen und Risiken des Klimawandels in der Energiewirtschaft durchgeführt (Dunkelberg et al. 2011). Im Mittelpunkt der Diskussion standen dabei die Elektrizitätserzeugung, insbesondere aus fossilen Energieträgern und Windenergie, sowie die Übertragung von Elektrizität in Stromnetze und ihre Verteilung. Hierbei wurde die Klimafolgenbetroffenheit nach Wertschöpfungsstufen differenziert, von der Energieträgergewinnung über Transport, Umwandlung, Übertragung und Verteilung der Energie bis hin zu ihrer Nachfrage. Auch die deutsche Anpassungsstrategie (DAS) orientiert sich in ihrer Beschreibung des Energiesektors an dieser energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette (Deutsche Bundesregierung 2008).

Als wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen kann festgehalten werden: Übereinstimmend wird eine hohe Verletzlichkeit der Hochspannungsnetze gegenüber Extremwetterereignissen, Stürmen und Schneelasten angenommen, welche die Versorgungssicherheit in größeren Gebieten beeinträchtigen kann. Auch können Hitzewellen (Definition ► Kap. 6) zu einer verminderten Leistungsfähigkeit und zu Kapazitätsengpässen bei konventionellen Grundlastkraftwerken führen, da diese auf ein kontinuierliches Wasserdargebot zur Kühlung angewiesen sind. Bei einem gleichzeitigen Anstieg des Kühlungsbedarfs im Gebäudebestand aufgrund längerer Hitzeperioden im Sommer besteht zudem die Gefahr einer Überlastung der Stromnetze.

Durch die Dezentralisierung des Versorgungssystems und die damit verbundene stärkere Bedeutung regenerativer Energiequellen verändert sich auch die Anfälligkeit des Systems gegenüber Klimaänderungen. Deutlich ist beispielsweise, dass sich auf der einen Seite die Abhängigkeiten von langen Transportketten und den Gewinnungsbedingungen in den Rohstofflieferländern verringern.

Auf der anderen Seite sind die regenerativen Energiequellen deutlich abhängig vom Wetter: Sonnenscheindauer, Windstärken, Wolkenbildung und Wasserdargebot können die Leistungsfähigkeit dieser Energiequellen beeinträchtigen, aber auch steigern (Koch et al. 2015). Insgesamt stieg der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch – also an der Menge des insgesamt verbrauchten Stroms inklusive Verteilungsverlusten und des Eigenverbrauchs der Erzeuger – von 1990 über die Jahre 2000 bzw. 2010 von 3,4 % auf 6,2 % bzw. 17,0 und 27,8 % in 2014. Der Anteil am Verbrauch von Primärenergie – d. h. der direkt aus Kohle, Gas, Öl, Biomasse usw. erzeugten Energie und Verlusten, die bei der Erzeugung der Endenergie aus der Primärenergie entstehen – nahm von 1,3 % auf 2,9 % bzw. 9,9 % sowie 11,1 % in 2014 zu (BMW 2015). Wetterabhängigkeit und steigender Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung begründen eine herausgehobene Betrachtung im Zusammenhang mit der Verletzlichkeit des Energiesystems als Ganzes.

### 24.1.1 Thermische Kraftwerke mit Wasserkühlung

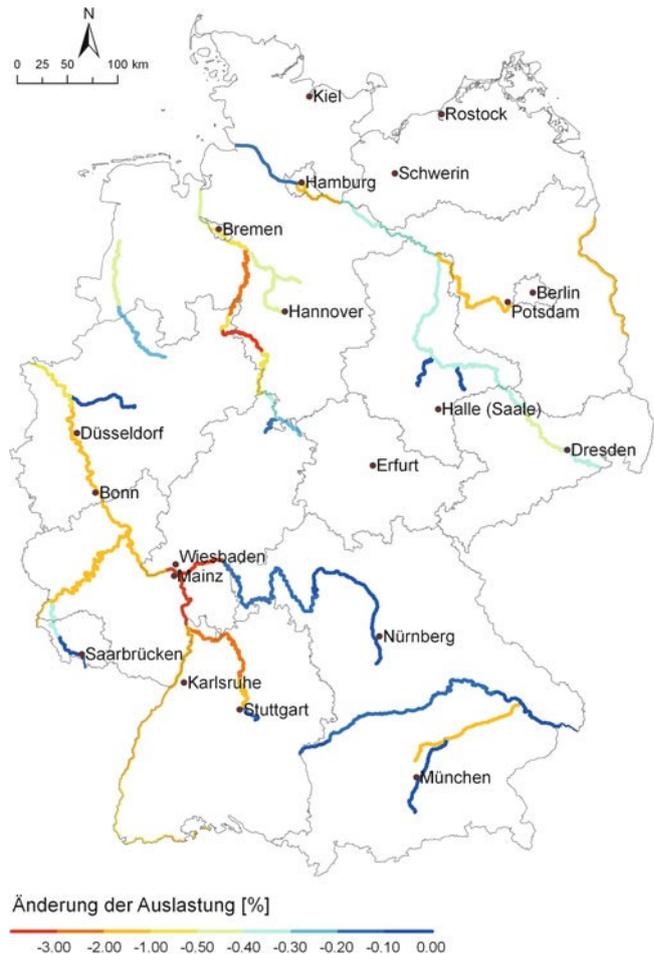
Bei der Betrachtung der Klimawirkungen auf thermische Kraftwerke sind die zukünftigen technologischen und umweltrechtlichen Entwicklungen sowie die Entwicklung des Energiebedarfs zu beachten, da geänderte Umweltstandards, Produktionssysteme und Kühlverfahren den Wasserbedarf und -verbrauch maßgeblich beeinflussen. Ein Beispiel zur modellhaften Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen geben Vögele und Markewitz (2014).

Thermische Kraftwerke mit Wasserkühlung können aufgrund erhöhter Wassertemperaturen, teilweise auch unzureichender Wasserverfügbarkeit von Produktionseinschränkungen betroffen sein (Förster und Lilliestam 2010; Linnerud et al. 2011). Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Produktion thermischer Kraftwerke werden somit von den hydrologischen Standortgegebenheiten beeinflusst, also vom Abfluss und von der Wassertemperatur. Daneben sind die Wahl des Kühlsystems und der von diesem abhängige Kühlwasserbedarf von Bedeutung. Einfache Durchlaufkühlsysteme sind gegenüber hohen Wassertemperaturen und Wassermangel durch Niedrigwasser deutlich anfälliger als Kreislaufkühlsysteme (Hoffmann et al. 2012; Koch und Vögele 2013; Koch et al. 2014).

Hinsichtlich der Wassernutzung thermischer Kraftwerke sind neben kraftwerksspezifischen Faktoren die Umweltbedingungen und gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich der für den Standort gültigen Grenzwerte zur maximal zulässigen Wasserentnahmemenge, zur Kühlwasseraufwärmung und zur Einleit- bzw. Mischtemperatur zu berücksichtigen. Strömung, Wassertiefe und weitere Faktoren unterscheiden sich entlang der Flüsse bzw. zwischen Flusseinzugsgebieten. Deswegen gelten für unterschiedliche Kraftwerksstandorte und Kühlsysteme verschiedene Grenzwerte. Steigt die Temperatur des Gewässers, so muss, falls die vorgeschriebene maximale Aufwärmspanne (Differenz der Temperatur von entnommenem und abgeleitetem Wasser) überschritten wird, der Kühlwasserbezug erhöht und die Abwärme über eine größere Menge Wasser abgeleitet werden. Steigt der Wasserbedarf zu stark an bzw. ist zu wenig Wasser verfügbar, muss die Leistung des Kraftwerks reduziert werden.

Eine Abschätzung der Wirkungen des Klimawandels auf thermische Kraftwerke in Deutschland zeigt, dass einige Regionen (z. B. die Rhein-Main-Neckar-Region) deutlich stärker als andere betroffen sind (Koch et al. 2015; ■ Abb. 24.1). Trotz dieser regionalen Unterschiede gilt, dass sommerliche Hitzewellen wie in den Jahren 2003 oder 2006 im Allgemeinen großräumige Phänomene sind. Das heißt: Probleme bei der Kühlwasserversorgung thermischer Kraftwerke treten ebenfalls großräumig auf, wenn auch mit unterschiedlicher Intensität. Aus diesem Grund ist ein Ausgleich von Produktionsdefiziten in Deutschland durch Stromimporte, etwa aus Frankreich, nur begrenzt möglich (Rübelke und Vögele 2011).

Koch et al. (2012) analysierten Szenarien mit unterschiedlichen ökonomischen Entwicklungen und unterschiedlichen Kraftwerkskapazitäten, Kühlsystemen und Wasserbedarfsforderungen für Berlin. Sie zeigen, dass durch technologische Entwicklung bzw. Anpassung der Kühlsysteme die Wirkungen des Klimawandels auf thermische Kraftwerke deutlich reduziert werden können.

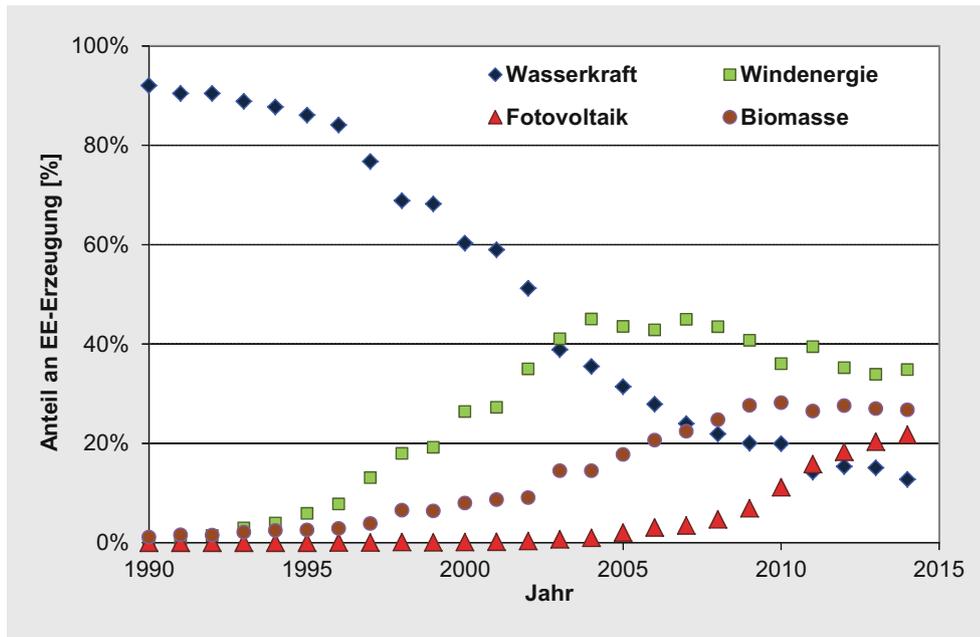


■ Abb. 24.1 Jahresmittelwerte der Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung; Änderung 2055 gegenüber 2010 bei einer Lufttemperaturzunahme von 2°C. (Weisz et al. 2013)

### 24.1.2 Wasserkraftanlagen

Die Erzeugung von Elektroenergie an Wasserkraftanlagen stellte in der Vergangenheit einen bedeutenden Anteil der erneuerbaren Energien. Obwohl die in Deutschland installierte Wasserkraftkapazität in den vergangenen Jahren leicht angestiegen ist, ist ihr Beitrag an den erneuerbaren Energien von 1990 über die Jahre 2000 und 2010 bis 2014 jedoch von 92 % über 60 % bzw. 20 % auf 13 % gesunken (BMW 2015; ■ Abb. 24.2). Dies kann mit dem starken Ausbau anderer erneuerbarer Energien erklärt werden, insbesondere von Windkraft und Solarenergie (s. u.). Da mit Wasserkraftanlagen im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien sowohl Grund- als auch Spitzenlast erzeugt werden kann, ist sie auch zukünftig ein wichtiger Baustein für die erneuerbaren Energien.

Für die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraft gibt es für Deutschland noch nicht sehr viele Studien. Deshalb wird hier auch über die Grenze nach Österreich und die Schweiz geschaut. Für Österreich wird bis 2040 mit einer leichten Zunahme der Wasserkrafterzeugung von 4–10 % gerechnet, je nach betrachtetem Klimaszenario. Bis zum Ende des Jahrhunderts ergeben sich allerdings größtenteils negative Klimawirkungen, die bezogen auf die Referenzperiode allge-



■ **Abb. 24.2** Entwicklung der Anteile an der Erzeugung erneuerbarer Energien (EE) (Daten: BMWi 2015). (Hagen Koch)

meine Reduktion der Wasserkrafterzeugung um bis zu 10 % betragen können (Klim Adapt 2010). Die Entwicklung der Wasserkrafterzeugung folgt damit weitestgehend den Trends in den Niederschlägen; in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird auch die steigende Verdunstung aufgrund erhöhter Temperaturen immer bedeutsamer.

Für die Obere Donau, d. h. den deutschen Teil des Donau-einzugsgebiets, muss mit einer Reduktion der Wasserkrafterzeugung um 8–16 % bis 2060 gerechnet werden (Prasch und Mauser 2010). Für kleinere Einzugsgebiete in den Schweizer Alpen simulieren Schaepli et al. (2007) für den Zeitraum 2070–2099 eine Abnahme der Produktion um 36 % gegenüber der Kontrollperiode. Für das Elbe-einzugsgebiet berechnen Grossmann und Koch (2011) eine Abnahme der Wasserkrafterzeugung um 13 % bis 2050 im Vergleich zu 2010.

Durch Effizienzzuwächse der Wasserkraftanlagen, z. B. den Ersatz alter Turbinen und Generatoren im Rahmen von notwendigen Erneuerungs- oder Sanierungsarbeiten (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2003), könnten die auftretenden Verluste allerdings größtenteils ausgeglichen werden.

### 24.1.3 Windkraftanlagen

Die Erzeugung von Elektroenergie durch Windkraftanlagen – auch Windenergieanlagen genannt – liefert in Deutschland einen steigenden Anteil an den erneuerbaren Energien. Die in Deutschland installierte Kapazität ist in den vergangenen Jahren deutlich angestiegen (1990 = 55 MW, 2000 = 6097 MW, 2010 = 27.180 MW, 2014 = 40.456 MW). Ihr Beitrag zu den erneuerbaren Energien ist von 0,4 % im Jahr 1990 auf über 26 % (2000) und von 2003 bis 2009 auf über 40 % gestiegen, um bei 36 % (2010) bzw. 35 % (2014) zu landen (■ Abb. 24.2).

Bisherige Analysen der Auswirkungen des Klimawandels zeigen, dass je nach Analysegebiet unterschiedliche, im Allgemeinen

jedoch nur geringe Auswirkungen auf das Windkraftpotenzial zu erwarten sind. Nach Pryor et al. (2005a, 2005b) ist für Nordeuropa eher mit positiven Effekten zu rechnen, insbesondere im Winter. Hinsichtlich des Offshore-Windpotenzials in Nordeuropa, zu dem auch die deutschen Küstengebiete zählen, finden Barstad et al. (2012) eine geringfügige Abnahme, wobei auf die große Unsicherheit bezüglich der Ergebnisse hingewiesen wird.

Nach Koch und Büchner (2015) weisen die Wirkungen des Klimawandels in der Summe einen positiven Effekt auf. In einzelnen Monaten zeigen sich Trends, in anderen Monaten sind keine Änderungen bzw. einheitliche Trends festzustellen. Räumlich profitieren eher Mittel- und Norddeutschland, während in Süddeutschland nur geringe, teilweise auch negative Effekte zu erwarten sind. Für die Jahresproduktion ergibt sich insgesamt eine Erhöhung um 2–5 %. Die Zunahme ist jedoch gering im Vergleich zum geplanten Ausbau von On- und Offshore-Windkraftanlagen. Analysen von Koch et al. (2015) bestätigen diese Aussagen grundsätzlich.

### 24.1.4 Solarenergieanlagen

Solarenergie gewinnt wie auch Elektroenergie aus Windkraftanlagen einen steigenden Anteil an den erneuerbaren Energien insgesamt. Die installierte Kapazität von Fotovoltaikanlagen ist in den vergangenen Jahren deutlich angestiegen (1990 = 2,0 MW, 2000 = 114 MW, 2010 = 17.944 MW, 2014 = 38.236 MW). Ihr Beitrag zu den erneuerbaren Energien ist vom Jahr 1990 über die Jahre 2000 und 2010 bis zum Jahr 2014 von 0,004 % über 0,17 % bzw. 11,2 % auf 22 % gestiegen (BMWi 2015; ■ Abb. 24.2).

Wachsmuth et al. (2013) analysieren die Wirkungen des Klimawandels auf Fotovoltaikanlagen in der Region Bremen-Oldenburg. Im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 finden sie leicht positive Effekte des Klimawandels für die Perioden 2036–2065 und 2071–2100. Sie verweisen jedoch auf die hohe

Unsicherheit der Ergebnisse, da z. B. Extremwetterereignisse oder thermische Effekte wie die Reduktion der Effizienz der Fotovoltaikanlagen mit steigender Temperatur nicht berücksichtigt wurden. Im Vergleich zum weiteren Ausbau der Fotovoltaik sind die dargestellten Änderungen gering.

### 24.1.5 Ausblick Energiesystem

Hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf die unterschiedlichen Erzeugungsformen ist die mit den Klimaszenarien verbundene Unsicherheit zu beachten. Dies gilt nicht zuletzt für klimatische Extremereignisse, da diese definitionsgemäß selten auftreten und schwer vorhersagbar sind. Die zur Wasserkraft-erzeugung aufgeführten Ergebnisse können bei Nutzung anderer (Klima-)Eingangsdaten für die hydrologischen Modelle in eine andere Richtung tendieren. Die aufgeführten Einschränkungen der Produktion thermischer Kraftwerke aufgrund hoher Wassertemperaturen können hingegen als gut gesichert angesehen werden, da alle Klimamodelle steigende Lufttemperaturen projizieren, die zu höheren Wassertemperaturen führen. Die Auswirkungen bezüglich Windkraft- bzw. Solarenergieerzeugung stellen sich nach aktuellem Wissensstand als eher gering dar.

Insgesamt ergibt sich durch die Vielzahl und die Vielfalt der Erzeugungsarten in einem zukünftigen Energiesystem eine andere Risikoverteilung, die auf das Gesamtsystem im Krisenfall stabilisierend wirkt. Eine intelligente Netzsteuerung und eine Erhöhung der Speicherkapazitäten können dazu beitragen, Ausfälle abzuf puffern und insgesamt Schwankungen von Angebot und Nachfrage auszugleichen. Positiv bewertet wird seitens Prognos/WI (2011), dass der Umgang mit diesen Risiken über das Ziel der Versorgungssicherheit bereits Regelungsgegenstand des Energiewirtschaftsgesetzes und Aufgabe der Bundesnetzagentur ist. Damit sind bereits grundsätzlich Handlungsoptionen und Zuständigkeiten im energiewirtschaftlichen System zur Versorgungssicherheit angelegt (Bothe und Riechmann 2008).

Durch die Veränderungen in den Versorgungsstrukturen erhöhen sich die Komplexität des Systems und die Anzahl der Akteure, die Versorgungsleistungen erbringen. Vor diesem Hintergrund müssen die bestehenden Formen des betrieblichen Risikomanagements an den Kraftwerksstandorten ergänzt werden durch eine umfassendere Risiko-*governance*, an der alle Akteure beteiligt werden, die etwas zur Risikominderung und Gefahrenabwehr beitragen können. Hierbei ist es wichtig, eine gemeinsame Wissensbasis zu schaffen, die sowohl die Risikolage beschreibt als auch die Wege zu Lösungen aufzeigt (Lucas 2014).

## 24.2 Wasserversorgung im klimatischen, demografischen und wirtschaftlichen Wandel

Während für das weltweite Dargebot an Trinkwasser durch den Klimawandel deutliche Einschnitte zu erwarten sind (Schewe et al. 2014), befindet sich Deutschland in einer moderaten Zone, was den Niederschlag und in der Folge die durchschnittliche Bildung von Grundwasser und das Abflussverhalten der Oberflä-

chengewässer angeht. Dennoch sind unterjährige und regionale Auswirkungen zu erwarten, je nachdem, ob das Trinkwasser aus Quell-, Grund- oder Fließgewässern gewonnen wird (MKULNV-NW 2011). Die wasserwirtschaftliche Bilanzierung, also die Gegenüberstellung des zukünftigen Wasserdargebots und der Wassernachfrage, ist für Versorgungsgebiete separat vorzunehmen, um die jeweiligen lokalen Besonderheiten und Auswirkungen berücksichtigen zu können.

Für Deutschland werden vergleichsweise moderate Auswirkungen des Klimawandels auf den Niederschlag und uneinheitliche Änderungen des möglichen Wasserdargebots erwartet (IPCC 2014; ► Kap. 7). In Verbindung mit weiteren – beispielsweise sozioökonomischen – Veränderungen können die technischen Infrastrukturen in der Wasserwirtschaft aber unter Anpassungsdruck geraten. Dieser wird dadurch hervorgerufen, dass sich durch den Klimawandel auch das Verbrauchsverhalten und die sozioökonomischen Entwicklungen ändern (Beauftragter der Bundesregierung für die Neuen Bundesländer 2011; MKULNV-NW 2013; BDEW 2010, 2012). Zur Vorgehensweise und Berechnung von Szenarien der Wasserwirtschaft haben z. B. Kersting und Werbeck (2013) gearbeitet. Für das Ruhrgebiet wurden dort sozioökonomische Wandelrends und klimaabhängige Wirkungen im Hinblick auf den Wasserbedarf ermittelt und für unterschiedliche Szenarien fortgeschrieben. Die Ergebnisse werden weiter unten beschrieben.

### 24.2.1 Determinanten des Wasserbedarfs

Um Szenarien erstellen zu können, müssen Daten und Informationen über den Wasserbedarf differenziert nach einzelnen Wirkungsbereichen, etwa dem Wasserbedarf in Haushalten oder im Gewerbe, bestimmt werden. Für den Einsatz in Wasserbedarfsprognosen einzelner Versorgungsgebiete sind deshalb Wirkungsmodelle einzusetzen, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen den sich ändernden Einflussfaktoren – den Wirkungsfeldern – und den Nachfragemengen in den Wirkungsbereichen abbilden. Für die Wirkungsfelder werden die jeweiligen relevanten MengenkompONENTEN (z. B. Bevölkerungszahl, Arbeitsplätze oder Bruttowertschöpfung) und der spezifische Wasserbedarf (Liter je Einwohner und Tag,  $m^3$  je 1000 € Bruttowertschöpfung) auf der jeweiligen regionalen Grundlage ermittelt und für die zukünftige Entwicklung geschätzt (Kluge et al. 2007; Pretenthaler und Dalla-Via 2007; Neunteufel 2010).

### 24.2.2 Bildung von Szenarien

Mittels Szenarien und regionsspezifischer Wirkungsmodelle werden die Auswirkungen des Klimawandels und der sozioökonomischen Entwicklungen auf den Wasserbedarf errechnet. Die Szenarien repräsentieren zukünftige Entwicklungen oder Kombinationen einzelner Entwicklungen von Einflussfaktoren auf die Wassernachfrage. Die Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse liefert Erkenntnisse dahingehend, ob über alle Szenarien ähnliche Entwicklungen zu erwarten sind oder ob diese sich deutlich unterscheiden.

Die Berücksichtigung der Klimawirkungen auf den Wasserbedarf kann dabei auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Der Einfluss des Klimas auf die nachgefragten Jahreswassermengen wird beispielsweise durch eine Bewertung der Variabilität vergangener Jahreswassermengen (Mikat et al. 2010) oder durch die Summe der witterungsbedingt variablen Tagesverbräuche für ein Jahr abgeschätzt (Kluge et al. 2007).

Eine andere Vorgehensweise stellt die Entwicklung der Jahreswassermengen und die Entwicklung der Spitzenlast gegenüber den durchschnittlichen Tagesmengen dar, die aus den Jahresmengen berechnet werden. Die Spitzenlast kann dabei über eine Relation vergangener Abweichungen der Spitzenlast von der Normallast und der zukünftig zu erwartenden klimabedingten Witterungsverhältnisse modelliert werden (Tränckner et al. 2012; Roth et al. 2011). Eine Alternative bietet die tagesgenaue Schätzung des Wasserbedarfs mittels statistischer Modelle. Diese Modelle können unterschiedlichste Einflussfaktoren auf den Tageswasserverbrauch beinhalten, z. B. Temperatur, Niederschlag, Wochenenden oder Jahreszeiten. Die auf diesen Modellen basierenden geschätzten Tageswerte werden dem durchschnittlichen Tagesverbrauch gegenübergestellt. Mit diesem Verfahren kann auch der Einfluss zukünftiger Witterungslagen auf den Wasserverbrauch simuliert werden (Kersting und Werbeck 2013).

Ein Beispiel für die Ergebnisse einer Szenarienbildung für den zukünftigen Wasserbedarf im Ruhrgebiet ist in ■ Abb. 24.3 dargestellt (Kersting und Werbeck 2013). Eine Kurzfassung und Übersicht über die eingesetzten Szenarien wird in Quirnbach et al. (2013) gegeben. Genutzt wurden in dieser Studie Ergebnisse des Regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario SRES A1B, die sich dadurch unterscheiden, dass die Realisierungen (CLM1, CLM2) zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit leicht unterschiedlichen Randbedingungen gestartet wurden. Berechnet wurden die Wasserbedarfsmengen bis zum Jahr 2030 für drei Zukunftsszenarien:

1. für ein Trendszenario, das die wesentlichen Entwicklungen trendmäßig fortschreibt,
2. für ein *best-case*-Szenario, das sich hinsichtlich der Bevölkerungs- und ökonomischen Entwicklung besser als das Trendszenario darstellt und eine zusätzliche Anstrengung im ressourcenschonenden Einsatz von Wasser in Haushalten und Gewerbe unterstellt, und
3. für ein *worst-case*-Szenario, in dem eine deutlichere Bevölkerungsabnahme und eine Verschlechterung der wirtschaftlichen Leistung angenommen wird.

Je nach Szenario wird die Wassernachfrage von 2010 bis 2030 um 14–18 % zurückgehen. Die Bandbreite der klimabedingten Schwankungen des Tagesbedarfs wird dagegen steigen. In der Referenzperiode (datenbedingt der Zeitraum 2002–2010) lagen 95 % aller täglichen Wasserverbrauchsmengen in dieser Region in einer Bandbreite von –8 bis +18 % um die langfristige Entwicklung der Durchschnittswerte.

Durch die in Zukunft höheren Temperaturen, die Änderungen der jährlichen Niederschlagsmenge und die geänderte unterjährige Verteilung der Niederschläge wird insbesondere die Abweichung des Spitzenbedarfs vom Durchschnitt im Ruhrgebiet bis 2030 steigen. Während im Trendszenario der durchschnitt-

liche Wasserbedarf um 14 % zurückgeht, sinkt die obere Grenze der Bandbreite nur um 5–8 %, je nach verwendetem Klimamodell (hier die beiden Rechenläufe des dynamischen regionalen Klimamodells CLM). Wie im *best-case*-Szenario in der Modellierung für das Ruhrgebiet gezeigt, ist ein durchschnittlicher Rückgang der Wassernachfrage von ca. 16 % zu erwarten. Die obere Grenze der Bandbreite sinkt bis 2030 dagegen nur um 7–10 %. Innerhalb der dargestellten Bandbreite liegen 95 % aller täglichen Wasserbezüge. Wird eine extrem heiße und trockene Periode betrachtet, ergibt sich im Vergleich zur oberen Bandbreite der Referenzperiode für das Jahr 2030 ein nahezu unveränderter Wasserbedarf. Dieser ist für die beiden CLM-Rechenläufe in ■ Abb. 24.3 als „Extremwert“ abgebildet. Im *worst-case*-Szenario ist durchschnittlich mit einem Rückgang der Wasserbedarfsmenge um 18 % für das Ruhrgebiet zu rechnen. Die obere Bandbreite sinkt um 9–12 %. In extremen Perioden ist hier im Vergleich zur oberen Bandbreite der Referenzperiode lediglich mit einem Rückgang zwischen 2 und 3 % zu rechnen.

Für den deutschen Teil des Elbeinzugsgebiets wird für unterschiedliche Szenarien (Blazejczak et al. 2012; Hartje et al. 2014; von Ansmann 2014) eine Abnahme des Wasserbedarfs in Haushalt und Kleingewerbe von 2004 bis 2020 um 10–20 % berechnet. Diese Abnahme wird größtenteils durch die demografische, teilweise auch technologische Entwicklung hervorgerufen. Dem Klimawandel, der sich in den Szenarien bis 2020 nur geringfügig bemerkbar macht, werden nur geringe Wirkungen zugerechnet. In den Szenarien wird von einer weiteren Konzentration um Metropolenregionen sowie einem weiteren Bevölkerungsrückgang in ländlichen Räumen ausgegangen. Somit können in einzelnen Regionen deutlich abweichende Trends auftreten. Dabei kann der Wasserbedarf im Allgemeinen mit hoher Sicherheit befriedigt werden; lokal werden Defizite ausgewiesen (Ansmann und Kaltofen 2011; Kaltofen et al. 2014).

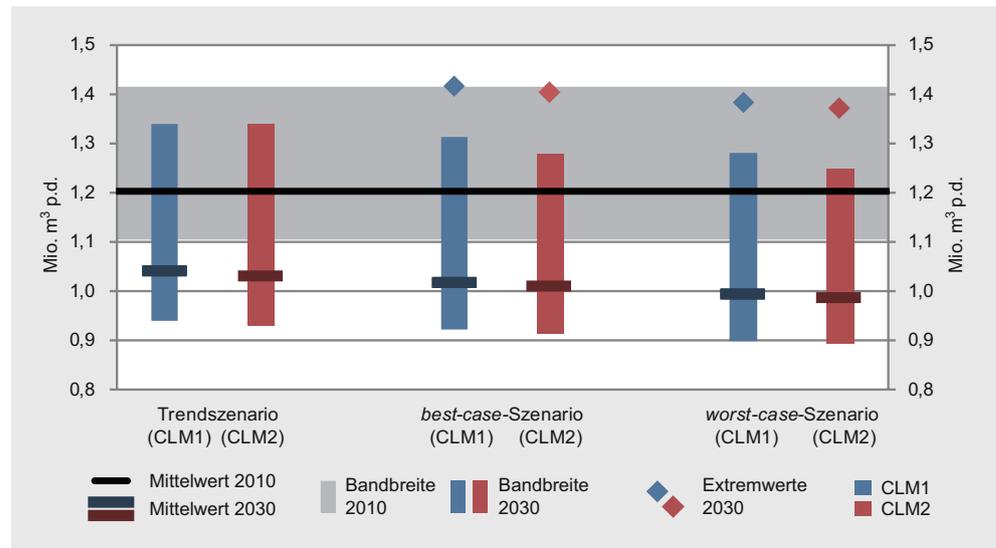
Inwieweit diese regionalen Studien sich auf ganz Deutschland übertragen lassen, wäre in einer weiteren Studie zu klären.

Grundsätzlich ist der Haushaltswasserbedarf u. a. durch die Bevölkerungsgröße determiniert. Projektionen der Bevölkerungsentwicklung in Deutschland gehen von einer sinkenden Einwohnerzahl aus. So rechnet BMU (2010) damit, dass die Einwohnerzahl in Deutschland von ca. 83 Mio. auf voraussichtlich 67 Mio. im Jahre 2050 sinkt. Unter Annahme eines stabilen Wassergebrauchs von 123 l pro Einwohner und Tag ergäbe sich ein jährlicher Wasserbedarf von ca. 3,0 Mrd. m<sup>3</sup> im Jahr 2050, was einer Reduktion um ca. 18 % gegenüber 2008 entspräche. Dabei sind allerdings regional starke Unterschiede in der Entwicklung möglich, insbesondere zwischen Ballungsräumen und ländlich geprägten Gebieten. Ein verstärkter Trend zu Single-Haushalten mit spezifisch höherem Wasserverbrauch, wie er in den letzten Jahren beobachtet wurde, wirkt hingegen dem allgemein sinkenden Trend entgegen (s. auch Koch und Grünwald 2011)

### 24.2.3 Ausblick Wasserversorgung

Der Klimawandel stellt eine Herausforderung dar, der sich die Wasserversorgung stellen muss. Anpassungsmaßnahmen müssen berücksichtigen, dass die Wassernachfrage auch, aber

■ **Abb. 24.3** Szenarienergebnisse für das Ruhrgebiet: Abweichungen des Wasserbedarfs vom Tagesdurchschnitt (p.d.). (Michael Kersting)



nicht nur durch Klimaänderungen bestimmt wird. Darüber hinaus ist insbesondere der sozioökonomische Wandel zu beachten. In den Wasserbedarfsszenarien für Versorgungsgebiete in Deutschland wird in den meisten Fällen ersichtlich, dass der Bedarf deutlich abnehmen wird, und zwar sowohl durch den wirtschaftlich-technologischen als auch den demografischen Wandel, hin zu weniger und älteren Einwohnern. Dieser Rückgang wird zudem durch Effekte des Klimawandels beeinflusst, z. B. durch höhere Durchschnittstemperaturen und ein geändertes Niederschlagsregime. Allerdings wird sich die Variabilität der täglich nachgefragten Wassermengen deutlich erhöhen. Insbesondere in den Sommermonaten wird die Spitzenlast im Trinkwasserbezug deutlicher über dem Jahresdurchschnitt liegen als in der Vergangenheit.

Diese Veränderungen führen zunächst durch die längere Verweildauer des Trinkwassers in den Leitungen zu technischen Herausforderungen. Zusätzlich wirkt sich diese Entwicklung durch den hohen Anteil an fixen Kosten bei der Wasserversorgung auf die Finanzierung aus. Werden die Kosten in starkem Maße durch mengenabhängige Entgelte refinanziert, ist wegen der hohen Fixkostenanteile durch den Einsatz langlebiger Infrastrukturen eine eindeutige Entwicklung zu skizzieren: Die durchschnittlichen Verbrauchsmengen sinken; die konstanten Fixkosten werden diesen zugeordnet, sodass die Entgelte pro Kubikmeter steigen, was zu einem verstärkten Anreiz führt, Wasser einzusparen. Dieses Gebühren- und Tarifsysteem gilt es zu reformieren, wenn die Wasserver- und die Abwasserentsorgung in Zeiten des demografischen, wirtschaftlichen und Klimawandels finanzierbar bleiben sollen. Eine Kapazitätsreduzierung ist aufgrund der Langlebigkeit häufig nur im Zuge sukzessiver Erneuerungsmaßnahmen möglich bzw. kann aufgrund der nur wenig sinkenden Spitzenlasten nicht oder nur in begrenztem Umfang erfolgen.

Auf einen umfangreichen Rückbau von Wasserversorgungssystemen, die häufig Oberflächen- und Grundwasser sowie Uferfiltrat nutzen, in Erwartung der demografischen Entwicklung sollte auch im Sinne des Vorsorgeprinzips verzichtet werden. In Zukunft ist mit höheren Spitzenverbräuchen durch den Klima-

wandel zu rechnen, für den ebenfalls eine Versorgungssicherheit gewährleistet werden muss. Dezentrale Systeme können aufgrund ihrer Größe und Flexibilität zwar besser an Änderungen angepasst werden, doch müssen sie durch Redundanzen gegen Ausfall einzelner Quellen gesichert werden (s. auch Koch und Grünewald 2011).

### 24.3 Kurz gesagt

Bei den Effekten ist die mit den Klimaszenarien verbundene Unsicherheit – insbesondere für Klimaextreme – zu beachten. Berechnungen von Hochwasserschäden an Wasserkraftanlagen und thermischen Kraftwerken oder von Sturmschäden an Windkraftanlagen sind daher mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Dies gilt nicht zuletzt, da Extreme definitionsgemäß seltene Ereignisse darstellen und schwer vorhersagbar sind.

Hinsichtlich der Wasserkrafterzeugung aufgeführte Ergebnisse können bei Nutzung anderer Ausgangsdaten für die hydrologischen Modelle (► Kap. 16) in eine andere Richtung tendieren, da für unterschiedliche Regionen Deutschland je nach genutztem Klimamodell eine Zu- oder Abnahme der Niederschläge projiziert wird. Langfristige Trends (z. B. Einschränkungen der Produktion thermischer Kraftwerke aufgrund hoher Wassertemperaturen) können hingegen als gut gesichert angesehen werden.

Der Klimawandel stellt die Versorgungssysteme vor neue Herausforderungen. Diese sind nicht isoliert zu betrachten, sondern werden durch den demografischen, wirtschaftlichen und siedlungsstrukturellen Wandel überlagert, verstärkt oder abgemildert. Alle Einflussfaktoren sind simultan zu betrachten, wenn die Versorgung in Zukunft sicher und effizient sein soll.

Gesondert zu untersuchen sind langfristige Trends, die sich aus den kombinierten Wandelprozessen ergeben, und kurzfristige Abweichungen vom Trend, die von Klimaextremen bestimmt werden. Da die Wandelprozesse in Regionen unterschiedlich ausfallen, sind spezifisch angepasste Szenarien anzuwenden, um mögliche zukünftige regionale Entwicklungen abzubilden.

## Literatur

- Ansmann T (2014) Szenarien zur Wassernachfrage der öffentlichen Wasserversorgung. In: Wechsung F, Hartje V, Kaden S, Venohr M, Hansjürgens B, Gräfe P (Hrsg) Die Elbe im globalen Wandel. Eine integrative Betrachtung. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Bd. 9. Weißensee Verlag, Berlin, S 319–334
- Ansmann T, Kaltoven M (2011) Modellierung der Haushaltswassernachfrage und -versorgung. In: Wechsung F, Koch H, Gräfe P (Hrsg) Elbe-Atlas des globalen Wandels. Weißensee Verlag, Berlin, S 74–75
- Barstad I, Sorteberg A, dos-Santos Mesquita M (2012) Present and future offshore wind power potential in northern Europe based on downscaled global climate runs with adjusted SST and sea ice cover. *Renew Energy* 44:398–405
- BDEW (2010) Auswirkungen des Klimawandels und des demografischen Wandels auf die Wasserwirtschaft (Wasser/Abwasser-Info). Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin
- BDEW (2012) Wasserfakten im Überblick. [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/C12578300558C9FC125766C0003CBAF/\\$file/Wasserfakten%20im%20%20C3%9Cberblick%20-%20freier%20Bereich%20April%202012\\_1.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/C12578300558C9FC125766C0003CBAF/$file/Wasserfakten%20im%20%20C3%9Cberblick%20-%20freier%20Bereich%20April%202012_1.pdf) (Erstellt: April 2012)
- Beauftragter der Bundesregierung für die Neuen Bundesländer (2011) Daseinsvorsorge im demografischen Wandel zukunftsfähig gestalten. Beauftragter der Bundesregierung für die Neuen Bundesländer, Berlin
- Birkmann J, Bach C, Guhl S, Witting M, Welle T, Schmude M (2010) State of the Art der Forschung zur Verwundbarkeit kritischer Infrastrukturen am Beispiel Strom, Stromausfall. *Forschungsforum Öffentliche Sicherheit*, Schriftenreihe Sicherheit Nr. 2, Berlin
- Blaziejczak J, Gornig M, Hartje V (2012) Downscaling nonclimatic drivers for surface water vulnerabilities in the Elbe river basin. *Reg Environ Chang* 12:69–68
- BMU (2010) Umweltpolitik – Wasserwirtschaft in Deutschland. Teil 1 – Grundlagen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- BMW (2015) Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin (Stand: Februar 2015)
- Bothe D, Riechmann C (2008) Hohe Versorgungszuverlässigkeit bei Strom wertvoller Standortfaktor für Deutschland. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 58(10):31–36 (Sonderdruck)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2003) Gutachten zur Berücksichtigung großer Laufwasserkraftwerke im EEG. Endbericht. [http://www.ulrich-kelber.de/medien/doks/20030600\\_gutachten\\_wasserkraft.pdf](http://www.ulrich-kelber.de/medien/doks/20030600_gutachten_wasserkraft.pdf)
- Deutsche Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Die Bundesregierung, Berlin ([http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf))
- Dunkelberg E, Hirschl B, Hoffmann E et al (2011) Ergebnis des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels – Energiewirtschaft. In: Hoffmann E, Gebauer J (Hrsg) Stakeholder Dialoge. Chancen und Risiken des Klimawandels. Reihe Climate Change, Bd. 03/2011. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S 67–75
- Förster H, Lilliestam J (2010) Modeling thermoelectric power generation in view of climate change. *Reg Environ Chang* 10:327–338
- Gausemeier J, Fink A, Schlake O (1996) Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien. Hanser Fachbuchverlag, München
- Göbbling-Reisemann S, Stürmann S, Wachsmuth J, von Gleich A (2013) Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen. In: Ekardt F, Hennig B (Hrsg) Die deutsche „Energiewende“ nach Fukushima. metropolis-verlag, Marburg, S 367–395
- Grossmann M, Koch H (2011) Wasserkraftanlagen. In: Wechsung F, Koch H, Gräfe P (Hrsg) Elbe-Atlas des globalen Wandels. Weißensee Verlag, Berlin, S 70–71
- Hartje V, Ansmann T, Blaziejczak J, Gömann H, Gornig M, Grossmann M, Hillenbrand T, Hoymann J, Kreins P, Markewitz P, Mutafoğlu K, Richmann A, Sartorius C, Schulz E, Vögele S, Wal R (2014) Regionalisierung globaler sozioökonomischer Wandelprozesse für die Wasserwirtschaft – Die Elbe als mittleres Einzugsgebiet. In: Wechsung T, Hartje F, Kaden V, Venohr S, Hansjürgens M, Gräfe BP (Hrsg) Die Elbe im globalen Wandel. Eine integrative Betrachtung. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft 9. Weißensee Verlag, Berlin, S 35–66
- Hoffmann B, Häfele S, Karl U (2012) Analysis of performance losses of thermal power plants in Germany – a system dynamics model approach using data from regional climate modelling. *Energy* 49:193–120
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. WGI, AR5, Cambridge
- Kaltoven M, Hentschel M, Kaden S, Dietrich O, Koch H (2014) Wasserverfügbarkeit im deutschen Elbegebiet. In: Wechsung F, Hartje V, Kaden S, Venohr M, Hansjürgens B, Gräfe P (Hrsg) Die Elbe im globalen Wandel. Eine integrative Betrachtung. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Bd. 9. Weißensee Verlag, Berlin, S 377–340
- Kersting M, Werbeck N (2013) Trinkwasser und Abwasser in Zeiten des Wandels. Eine Szenarienbetrachtung für die dynamik-Region. dynamik-Publikation, Bd. 39. dynamik, Essen
- KlimAdapt (2010) Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Adaption des Energiesystems an den Klimawandel. Endbericht, Studie im Auftrag der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG). Technische Universität Wien, Wien
- Kluge T, Deffner J, Götz K, Liehr S, Michel B, Michel F, Rührich W (2007) Wasserbedarfsprognose 2030 für das Versorgungsgebiet der Hamburger Wasserwerke GmbH (HWW). Ergebnisbericht. Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt am Main
- Koch H, Grünwald U (2011) Anpassungsoptionen der Wasserbewirtschaftung an den globalen Wandel in Deutschland. *acatech Materialien*, Bd. 5. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München
- Koch H, Vögele S (2013) Hydro-climatic conditions and thermoelectric electricity generation – Part I: development of models. *Energy* 63:42–51
- Koch H, Büchner M (2015) Is climate change a threat to the growing importance of wind power resources in the energy sector in Germany? In: *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*
- Koch H, Vögele S, Kaltoven M, Grünwald U (2012) Trends in water demand and water availability for power plants – scenario analyses for the German capital Berlin. *Clim Chang* 110:879–899
- Koch H, Vögele S, Hattermann F, Huang S (2014) Hydro-climatic conditions and thermoelectric electricity generation – Part II: model application to 17 nuclear power plants in Germany. *Energy* 69:700–707
- Koch H, Vögele S, Hattermann F, Huang S (2015) The impact of climate change and variability on the generation of electrical power. *Meteorol Z* 24:173–188
- Linnerud K, Mideksa T, Eskeland G (2011) The impact of climate change on nuclear power supply. *Energy J* 32:149–168
- Lucas R (2014) Vom Wissensmanagement zum Wertemanagement. Anpassungslernen und regionaler Wandel. In: Beese K, Fekkek M, Katz C, Körner C, Molitor H (Hrsg) Anpassung an regionale Klimafolgen kommunizieren. Konzepte, Herausforderungen und Perspektiven. Oekom-Verlag, München, S 275–391
- Mikat H, Wagner H, Roth U (2010) Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100 – Langfristige Prognose im Rahmen eines Klimafolgen-Projektes. *gwf-Wasser Abwasser* 151(12):1178–1186
- MKULNV-NW (2011) Klimawandel und Wasserwirtschaft. Maßnahmen und Handlungskonzepte in der Wasserwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- MKULNV-NW (2013) Umweltbericht Nordrhein-Westfalen 2013. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- Neunteufel R (2010) Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Teil 1: Literaturstudie zum Wasserverbrauch – Einflussfaktoren, Entwicklung und Prognosen. Lebensministerium, Wien
- Prasch M, Mauser W (2010) Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der Oberen Donau. In: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Berichte, Bd. 15., S 293–302
- Pretenthaler F, Dalla-Via A (2007) Wasser & Wirtschaft im Klimawandel. Konkrete Ergebnisse am Beispiel der sensiblen Region Oststeiermark. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien

## Literatur

- Prognos/WI (2011) Evaluierung möglicher Anpassungsmaßnahmen in den Sektoren Energie, Industrie, Mittelstand und Tourismus vor dem Hintergrund der Erarbeitung eines „Aktionsplans Anpassung“ der Bundesregierung. Endbericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Prognos AG, Wuppertal Institut, Düsseldorf, Berlin, Wuppertal ([http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/110131\\_Prognos\\_Endbericht\\_-\\_BMWi\\_Anpassung\\_Klimawandel\\_final.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/110131_Prognos_Endbericht_-_BMWi_Anpassung_Klimawandel_final.pdf))
- Pryor SC, Barthelmie RJ, Kjellström E (2005a) Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. *Clim Dyn* 25:815–835
- Pryor SC, Schoof JT, Barthelmie RJ (2005b) Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: empirical downscaling of multiple AOGCMs. *Clim Res* 29:183–198
- Quirnbach M, Freistühler E, Kersting M, Wienert B (2013) Regionale Szenarien zum Klima- und sozioökonomischen Wandel der Emscher-Lippe-Region (Ruhrgebiet). *dynaklim-Kompakt*, Bd. 15. dynaklim, Essen
- Roth U, Mikat H, Wagner H (2011) Prognose zur Entwicklung des Spitzenwasserbedarfs unter dem Einfluss des Klimawandels. Eine Abschätzung am Beispiel der hessischen Landeshauptstadt Wiesbaden. *gwf-Wasser Abwasser* 152(2):94–100
- Rübelke D, Vögele S (2011) Impacts of climate change on European critical infrastructures: the case of the power sector. *Environ Sci Policy* 14:53–63
- Schaeffli B, Hingray B, Musy A (2007) Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1191–1205
- Schewe J, Heinke J, Gerten D, Haddeland I, Arnell NW, Clark DB, Dankers R, Eisner S, Fekete BM, Colon-Gonzalez FJ, Gosling SN, Kim H, Liu X, Masaki Y, Portmann FT, Satoh Y, Stacke T, Tang Q, Wada Y, Wisser D, Albrecht T, Frieler K, Piontek F, Warszawski L, Kabat P (2014) Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111:3245–3250
- Tränckner J, Koenig T, Nowack M (2012) Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Siedlungsentwässerung (DEMOWAS). [http://www.tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_forst\\_geo\\_und\\_hydrowissenschaften/fachrichtung\\_wasserwesen/isiw/sww/siedlungsentwässerung/forschungse/2010\\_DemoWaS/DemoWaS\\_FinalReport.pdf](http://www.tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/isiw/sww/siedlungsentwässerung/forschungse/2010_DemoWaS/DemoWaS_FinalReport.pdf)
- Vögele S, Markewitz P (2014) Szenarien zur Wassernachfrage großer thermischer Kraftwerke. In: Wechsung F, Hartje V, Kaden S, Venohr M, Hansjürgens B, Gräfe P (Hrsg) *Die Elbe im globalen Wandel. Eine integrative Betrachtung. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*, Bd. 9. Weißensee Verlag, Berlin, S 261–290
- Wachsmuth J, Gößling-Reisemann S (2013) Sektorale Roadmap Energie – Handlungspfade und Handlungsempfehlungen auf dem Weg zu einem klimangepassten und resilienten Energiesystem im Nordwesten, Projektbericht Nordwest 2050. Universität Bremen, Bremen
- Wachsmuth J, Blohm A, Gößling-Reisemann S, Eickemeier T, Ruth M, Gasper R, Stührmann S (2013) How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a metropolitan region in Northwest Germany. *Energy* 58:192–201
- Weisz H, Koch H, Lasch P, Walkenhorst O, Peters V, Vögele S, Hattermann FF, Huang S, Aich V, Büchner M, Gutsch M, Pichler PP, Suckow F (2013) Methode einer integrierten und erweiterten Vulnerabilitätsbewertung: Konzeptuell-methodische Grundlagen und exemplarische Umsetzung für Wasserhaushalt, Stromerzeugung und energetische Nutzung von Holz unter Klimawandel. *Clim Chang* 13(13):205 (Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau)

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.